



# Eficiencia, viabilidad y limpieza del Scrubber

**Autor:** Abdelhak El Hajoui Zaroili  
**Director:** Germán De Melo Rodríguez

Máster en gestión y operación de  
instalaciones energéticas  
marítimas



# Índice

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>3</b>
<b>Índice de ilustraciones</b> .....	<b>4</b>
<b>Terminología</b> .....	<b>6</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>7</b>
La contaminación del sector naval.....	8
Zonas ECA.....	13
Contaminación mundial .....	15
Cómo afectan estos elementos químicos a la atmósfera? .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b><i>El Scrubber</i></b> .....	<b>24</b>
Principio de funcionamiento .....	26
Sistema de circuito abierto .....	27
Sistema con circuito cerrado .....	28
Sistemas híbridos .....	28
<b>Partes importantes del scrubber</b> .....	<b>29</b>
Sistema abierto.....	29
Sistema cerrado.....	30
<b>Normativa de la IMO respecto al uso de sistemas EGCS</b> .....	<b>32</b>
Contextualización de la normativa.....	32
Regulaciones locales y regionales .....	33
Unión europea .....	33
Estados Unidos.....	34
Normativa internacional.....	35
Guía de la OMI para los sistemas de limpieza de gases de escape .....	35
Documentación requerida para el sistema EGC .....	38
Monitorización de emisiones.....	39
Criterios para la descarga del agua de lavado y monitorización .....	40
Agencia de protección ambiental de los estados unidos .....	42
<b>Comparativa económica del uso de combustibles que emiten menos NOx Y el uso permanente de combustibles con un contenido de azufre inferior al 1%</b> .....	<b>46</b>
El precio de los combustibles .....	46



Flota mundial .....	47
Cálculo teórico y comparación de los combustibles: .....	49
<b>Estudio de la contaminación portuaria y costera producida por los Scrubbers de sistema abierto. ....</b>	<b>56</b>
Reglamento para los componentes del agua residual .....	58
Casos reales estudiados .....	59
Metales pesados .....	61
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) .....	61
Nitratos/ Sulfatos .....	61
Conclusiones .....	62
Daños al medio ambiente producidos por estos componentes.....	63
<b>Alternativas al scrubber existentes en la actualidad.....</b>	<b>64</b>
Reductor de <i>NOx</i> de Wärtsila .....	64
Reducción catalítica selectiva (SCR).....	65
Reactor SCR.....	67
Elementos catalizadores .....	68
Sistema de soplado de hollín .....	69
Unidad de bombeo de Urea.....	69
Unidad de dosificación de urea .....	69
Unidad de aire.....	69
Unidad de control .....	69
Inyección de urea y unidad de mezcla.....	71
Condiciones de operatividad y limitaciones .....	72
Mantenimientos requeridos.....	73
Control de emisiones <i>SOx</i> .....	73
<b>Sugerencias de normativa futura .....</b>	<b>75</b>
Convención de las naciones unidas sobre el derecho del Mar (UNCLOS) .....	75
<b>Sugerencias para futuros proyectos .....</b>	<b>78</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>80</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>82</b>



## Agradecimientos

A Don Germán De Melo Rodríguez, el director del proyecto, por la gran implicación y la disponibilidad incondicional para resolver dudas y guiarme en todo el proceso de elaboración del proyecto.

A mis padres, por el apoyo constante durante todos estos años, ya que, lo único que ha importado siempre, es conseguir los objetivos que uno se marque. Y, eso me hará estar agradecido eternamente.

Y, a todos los que han estado relacionados con este proyecto, muchas gracias.

## Índice de ilustraciones

1. Noticia sobre la contaminación marina publicada por eldiario.es.  
Fuente: [www.eldiario.es](http://www.eldiario.es)
2. Representación de la reacción que define la combustión interna del motor.  
Fuente: [www.esss.co](http://www.esss.co)
3. Especificaciones del coche elegido como modelo de análisis.  
Fuente: [www.mobile.de](http://www.mobile.de)
4. Cantidad de Km recorridos anualmente en coche, por países.  
Fuente: EEA.
5. Cantidad de CO en el aire sobre el mar mediterráneo.  
Fuente: [www.windy.com](http://www.windy.com)
6. Documento entregado a los buques en cada operación de carga de combustible.  
Fuente: [www.galpenenergía.es](http://www.galpenenergía.es)
7. Representación de presiones y flujo de los gases después de la combustión.  
Fuente: [www.esss.co](http://www.esss.co)
8. Componentes principales del limpiador de gases de escape.  
Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems
9. Sistema de circuito abierto.  
Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems
10. Sistema de circuito cerrado.  
Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems
11. Sistema híbrido en configuración abierta.  
Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems
12. Sistema híbrido en configuración cerrada.  
Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems
13. Áreas ECA en el norte de Europa.  
Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems
14. Zona ECA en la costa californiana.  
Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems.
15. Proceso jerárquico de aprobación de la instalación.  
Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems.
16. Evolución del precio de los combustibles  
Fuente: [www.Shipbunker.com](http://www.Shipbunker.com)
17. Número de barcos en el mundo en enero 2019  
Fuente: [www.statista.com](http://www.statista.com)
18. Dimensiones del motor MAN B&W S90ME-C10.5.  
Fuente: [www.man-es.com/marine](http://www.man-es.com/marine)
19. Especificaciones del motor elegido definidas por el fabricante (Parte I).  
Fuente: [www.man-es.com](http://www.man-es.com)
20. Especificaciones del motor elegido definidas por el fabricante (Parte II).  
Fuente: [www.man-es.com](http://www.man-es.com)
21. Sistema de reducción de NOx planteado por Wärtsilä.  
Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment>
22. Esquema general del sistema SCR.

- Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment>
23. Estructura de una instalación con silenciador y scrubber, juntamente con el sistema SCR.  
Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment>
24. Estructura molecular del óxido de vanadio(V).  
Fuente: [es.wikipedia.org](https://es.wikipedia.org)
25. Distribución de los elementos de control.  
Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment>
26. Inyección de urea y unidad de mezcla.  
Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment>
27. Sistema híbrido planteado por Wärtsila.  
Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment>
28. Instalación con 1 entrada y 1 salida de gases con efecto Venturi.  
Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment>
29. Instalación con varias entradas y salidas de gases con efecto Venturi.  
Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment>
30. Representación mundial de los países firmantes de la UNCLOS.  
Fuente: [www.es.wikipedia.org](https://www.es.wikipedia.org)
31. Rutas de los buques de carga en todo el mundo.  
Fuente: [www.es.gizmodo.com](https://www.es.gizmodo.com)

## Terminología

**ECA:** Zonas de emisiones controladas, del inglés “Emissions Control Areas”

**WTI:** Precios convertidos de USD/barril a USD por mt. A un ratio de 7.62 barriles por tonelada métrica.

**Brent:** Precio convertido de USD/barril a USD por mt. A un ratio de 7.53 barriles por tonelada métrica.

**IFO380 & IFO180:** Combustibles con un máximo de azufre del 3.5%

**VLSFO:** Combustibles con un máximo de 0.5% de Azufre (también conocido como grado IMO2020)

**LS380 & LS180:** Máximo de azufre del 1% en el combustible.

**ULSFO:** Máximo del 0.1% de Azufre en el combustible, para cumplir con los requisitos de las regulaciones ECA 2015.

**MGO:** A no ser que sea especificado lo contrario, será “limpio y brillante” tendrá un máximo de 1.5% de azufre.

**LSMGO:** máximo de 0.1% de azufre en combustible destilado, para cumplir con las regulaciones ECA 2015.

**MDO:** máximo de 1.5% de azufre en combustible destilado

**LNG-380e:** Precio por la cantidad de LNG que aporta la energía equivalente a 1 tonelada métrica de combustible IFO380.

**LNG-MGO:** Precio por la cantidad de LNG que aporta la energía equivalente a 1 tonelada métrica de combustible MGO.

**LNG:** Gas natural licuado, del inglés “Liquified Natural Gas” / Precio por una tonelada métrica de Gas natural licuado.

**NOR:**  $NO_x$  reducir

## Introducción

En la actualidad, la contaminación del medio ambiente es un tema cada vez más presente y del que la gente es consciente de maneras más evidentes. Motivo por el que en los medios de comunicación también podemos encontrar varias citas sobre este tema, o bien, datos sobre los diferentes sectores que componen la totalidad de los factores contaminantes actualmente.

El sector naval no puede ser obviado en este tema ya que las embarcaciones tienen un consumo de combustible de niveles altos, comparados con la maquinaria que se trata a nivel cotidiano por la gente de a pie, por lo que puede llegar a crear una situación de alarma en el momento de leer algunas noticias. Sobre todo dependiendo de los titulares que se presentan en algunas ocasiones.

Como podemos ver en la noticia presentada por ejemplo en el periódico “*eldiario.es*” del día 5 de Junio de 2019, el transporte marítimo se presenta como el máximo contaminante y es comparado con los coches para el transporte terrestre, en la escala 1:1. Pero, dejando de lado la legitimidad de la comparación, nos despierta la curiosidad por saber si este sector es tan contaminante como se dice.

Por este motivo, en este proyecto se presentará detalladamente la contaminación de este sector y las diferentes opciones para llegar a la reducción de estos números, estudiando especialmente el caso de la instalación del sistema de limpieza de gases, conocido como “Scrubber”, para encontrar los motivos que podrían motivar a una compañía a tomar la decisión de instalar uno de estos equipos.



The screenshot shows a news article from *eldiario.es* with the following content:

- Header:** eldiario.es with social media icons and a 'Boletines' button.
- Sub-header:** Transporte marítimo contamina miles de veces más que el terrestre.
- Title:** El transporte marítimo contamina miles de veces más que el terrestre.
- Category:** Medio ambiente.
- Text Snippets:**
  - El límite máximo de contenido de azufre en los combustibles para el transporte marítimo, establecido por la Organización Marítima Internacional (OMI), es de 35.000 ppm frente a los 10 ppm permitidos en la Unión Europea en los carburantes para el transporte por carretera.
  - 15 de los barcos más grandes del mundo emitan tanta contaminación atmosférica como 760 millones de automóviles.
  - España, Italia y Grecia, seguidas de cerca por Francia y Noruega, son los países europeos más expuestos a la contaminación generada por los cruceros.
- Author:** Carlos Bravo e Isabel Buschell - Consultor en Salvia Energía, Derecho y Medio Ambiente | coordinadora para Transport&Environment en España.
- Date:** 05/06/2019 - 00:01h.
- Image:** A coastal town with buildings and a bay.

Ilustración 1 Noticia sobre la contaminación marina publicada por *eldiario.es*. Fuente: [www.eldiario.es](http://www.eldiario.es)



## La contaminación del sector naval

Cuando se quiere hablar sobre la contaminación del sector naval, debemos primeramente hacer una diferenciación entre el combustible usado en los diferentes casos y es que existen 3 tipos de combustibles actualmente:

- a) Fuel oil pesado (HFO)
- b) Marine diésel oil (MDO)
- c) Gas natural licuado (LNG)

### Fuel Oil Pesado (HFO)

El término genérico fuelóleo pesado (HFO) describe los combustibles que se utilizan para generar movimiento o los combustibles para generar calor que tienen una alta viscosidad y densidad. En el Convenio internacional para prevenir la contaminación ocasionada por los buques (Convenio MARPOL) de 1973, los fuelóleos pesados se definen por una densidad superior a  $900 \text{ kg/m}^3$  a  $15^\circ\text{C}$  o una viscosidad cinemática de más de  $180 \text{ mm}^2/\text{s}$  a  $50^\circ\text{C}$ . Los fuelóleos pesados están formados por un gran porcentaje de moléculas pesadas, como hidrocarburos de cadena larga y aromáticos con cadenas laterales de rama larga y su color es negro.

Estos fuelóleos se utilizan principalmente como combustible marino y el HFO es el combustible marino más ampliamente utilizado hasta el momento; prácticamente todos los motores diésel marinos de media y baja velocidad están diseñados para funcionar con fuelóleo pesado.

El fuelóleo pesado es un combustible residual generado durante la destilación del crudo. La calidad del combustible residual depende de la calidad del crudo utilizado en la refinería. Para conseguir diversas especificaciones y niveles de calidad, estos combustibles residuales se mezclan con combustibles más ligeros como gasóleo marino o diésel marino. Las mezclas resultantes se denominan también fuelóleos intermedios (IFO) o diésel marino. Se clasifican y se nombran en función de su viscosidad. Los tipos más frecuentemente utilizados son IFO 180 e IFO 380, con viscosidades de  $180 \text{ mm}^2$  y de  $380 \text{ mm}^2$ , respectivamente. Las mezclas en las que predomina el fuelóleo pesado se clasifican dentro de la categoría de fuelóleo pesado. Puesto que se trata de mezclas de fuelóleo pesado con combustibles más ligeros, también pueden denominarse combustibles diésel marinos pesados.

La norma internacional ISO 8217 divide los combustibles marinos en combustibles destilados y combustibles residuales. Los últimos son los que se denominan generalmente fuelóleos pesados. Una excepción es el nivel más bajo de calidad viscosa, RMA 10, que ya no se considera un HFO, pues su proporción de fuelóleo pesado es demasiado pequeña. La ISO 8217 estipula que los

combustibles residuales y, por tanto, todos los fuelóleos pesados, no pueden contener combustible o aceites lubricantes usados.

Un rasgo diferenciador clave de los fuelóleos pesados es su contenido en azufre. De acuerdo con la norma ISO 8217, el contenido máximo en azufre no puede superar el 3,5%. En función del contenido en azufre, es posible diferenciar las siguientes clases principales:

Combustible marino	Contenido máximo en azufre
Fuelóleo alto en azufre (HSFO)	3,5%
Fuelóleo bajo en azufre (LSFO)	1,0%
Fuelóleo ultra bajo en azufre (ULSFO)	0,1%

Tabla 1 Definición de las diferencias entre los combustibles pesados. Fuente: [www.oiltanking.com](http://www.oiltanking.com)

### Fuelóleo alto en azufre (HSFO)

La opción más viable para las navieras, a nivel del precio del combustible, sería el fuel con alto contenido en azufre, ya que es el más asequible. Pero debido a la norma **ISO 8217**, para poder consumir este combustible, deberíamos contar con una instalación específica para convertir este combustible en apto para el consumo.

El sistema necesario para poder quemar este combustible, sería la depuradora de gases o EGCS y, para poder instalar este nuevo componente, debemos tener en cuenta varios factores anteriormente:

- **Espacio** disponible para la instalación de este nuevo componente
- **Tiempo** que va a permanecer el buque inoperativo debido al proceso de instalación
- El **coste** del limpiador de gases en sí mismo.
- **Tipo de buque** y tipo de operación del mismo, ya que un buque del tipo crucero con escape individual para cada motor, no será el mismo escenario que un buque petrolero con un único motor de 2 tiempos.

Pero, a favor de la empresa, estará la opción de seguir consumiendo el combustible con alto contenido de azufre durante la operación normal del buque.

## **Fuelóleo bajo en azufre (LSFO)**

Los fuelóleos pesados se denominan fuelóleos bajos en azufre (LSFO) si su contenido en azufre es inferior al 1%. Normalmente se trata de los combustibles marinos IFO 180 e IFO 380 que han sido desulfurados.

Este tipo de combustible estuvo permitido usarlo en las zonas de emisiones controladas (Zonas ECA) hasta finales de 2014. Pero posteriormente se aumentaron las restricciones y pasaron a permitirse solo combustibles con un máximo de azufre del 0,1%, hasta finales del 2019.

Y, finalmente, a partir del 2020, la organización marítima internacional pasó a limitar el contenido de azufre en los combustibles quemados a bordo, al 0,1% en todo el mundo.

## **Fuelóleo ultra bajo en azufre (ULSFO)**

Desde el 1 de enero de 2015, en aplicación del Anexo VI del Convenio MARPOL, las emisiones de los barcos deben contener un máximo del 0,1% de azufre en dichas zonas protegidas (ECA). Debido a estas estrictas restricciones, el uso de LSFO no es aceptable en estas zonas y ha sido prácticamente sustituido por el combustible marino fuelóleo ultrabajo en azufre (ULSFO), que cumple dichas limitaciones.

En teoría, los combustibles IFO altamente desulfurados también podrían utilizarse en esas zonas, pero en la práctica la desulfuración de fuelóleos tan pesados es demasiado cara y no resulta rentable. Por esta razón, actualmente el término fuelóleo ultra bajo en azufre suele hacer referencia al gasóleo marino, que ya es bajo en azufre, y no a los fuelóleos pesados desulfurados. El gasóleo marino está compuesto exclusivamente por destilados y tiene un contenido en azufre por debajo del 0,1%. Este combustible marino también se denomina gasóleo marino ultra bajo. El ULSFO se utiliza en motores diésel de media a alta velocidad. Cuando se pasa de LSFO a ULSFO, es necesario garantizar que el motor es tecnológicamente compatible con ULSFO.

## **Diesel oil marino (MDO)**

El diésel es un destilado medio y un combustible predominantemente mineral. El diésel está formado principalmente por diversos hidrocarburos procedentes del petróleo crudo, que se separan de este mediante un proceso de destilación. Es una fracción material del petróleo crudo, que se sitúa entre los fuelóleos pesados y los ligeros. La fracción con un punto de ebullición entre 200°C y 360°C se denomina gasóleo. El diésel es un gasóleo refinado. Las mezclas permiten conseguir un gasóleo con los parámetros necesarios para los diferentes estándares de combustible. Además de aditivos especiales, también se mezcla con biocombustibles como el biodiesel. Actualmente, puede incluirse hasta un máximo del 7% vol. de biodiesel en el diésel, de acuerdo con la norma DIN EN 14214. También pueden añadirse combustibles HVO (aceites vegetales hidrogenados), GtL (gas a líquido) y BtL (biomasa a líquido).

Los consumidores principales de este combustible son:

- Vehículos para el transporte por carretera
- Vehículos agrícolas
- Transporte marítimo
- Transporte ferroviario
- Maquinaria para la construcción
- Motores estacionarios

Los requisitos de calidad para el diésel están establecidos en la norma DIN EN 590. El requisito de que el diésel vendido en estaciones de servicio públicas deba cumplir con la norma UNE-EN 590 se ha incorporado a la legislación española, que implementa la Directiva europea 98/70/CE (Directiva relativa a la calidad de la gasolina y el diésel). La zona climática en la que se comercializa un combustible también es un factor que ha de tenerse en cuenta, pues el frío puede provocar la precipitación de la parafina en los combustibles diésel. Por esta razón, su composición varía en los distintos países. Por ejemplo, en Alemania se vende un "diésel de invierno" específico entre noviembre y febrero, pero esto no suele mencionarse en las estaciones de servicio.

En los grandes motores, especialmente los motores diésel marinos, se suelen utilizar grados más pesados de combustible, que suelen tener mayor contenido en azufre que el diésel de los vehículos de motor. Sin embargo, el contenido en azufre del diésel marino no ha aumentado, sino que está reduciéndose progresivamente como consecuencia del endurecimiento de los límites de emisiones en la legislación actual.

Un rasgo característico del diésel es la autoignición de la mezcla aire-combustible en la cámara de combustión. En la cámara de combustión, se realiza la compresión del aire (o una mezcla de aire-gas de escape). Antes de llegar al punto muerto superior del cilindro, se inyecta el diésel y posteriormente se inflama. Por ello, el índice de cetano (indicador de inflamabilidad) del diésel debería ser muy elevado.

En comparación con la gasolina, los combustibles diésel que pueden comprarse en el mercado como carburantes para vehículos de motor tienen en torno a un 10% más de densidad y de contenido de energía por litro.

## Gas natural licuado (GNL)

El gas natural es un gas combustible compuesto principalmente por metano, que es altamente inflamable ( $\text{CH}_4$ ). A efectos prácticos podríamos resumir la composición del gas natural licuado en:

- Metano 85%
- Etano 10%
- Propano 5%

Aunque cabe recalcar que la composición de etano y el propano es variable, además de encontrarse entre ellos también el butano, nitrógeno y dióxido de carbono, entre otros.

El gas natural se produce mediante procesos geoquímicos en material orgánico a grandes profundidades, de donde sube a través de grietas y poros de estratos de roca. Si encuentra barreras permeables en su ascenso, se forman depósitos subterráneos de gas, también llamados trampas de gas natural. Ocurre frecuentemente en combinación con petróleo crudo y, al igual que el crudo, se extrae, se limpia y se seca mediante perforaciones.

Tras el procesado, el gas natural o el metano se incorporan a la red de gas natural, a través de la cual se canaliza hacia los distintos puntos de consumo. El combustible está disponible en dos grados, gas H o gas L (del inglés “High” o “Low”). La calidad del gas que recibe un cliente depende de la zona de suministro.

Las reservas globales de gas natural son mucho más amplias que las de crudo. Las reservas de gas convencional más extensas se encuentran en Oriente Próximo. No obstante, para explotarlas es necesaria una elevada inversión, además de importantes canalizaciones y plantas de licuación para su transporte. En algunas regiones como el mar del Norte, ya puede constatarse que el combustible fósil es escaso, mientras que los volúmenes en Norteamérica han aumentado de nuevo, debido a la extracción de gas de lutita. Sin embargo, Rusia sigue siendo la principal fuente de gas natural de Europa.

El gas natural se utiliza principalmente para calentar edificios residenciales y comerciales y como suministro de calor en procesos térmicos en comercio e industria. No obstante, también puede convertirse en electricidad y puede utilizarse para alimentar vehículos de gas natural en forma

comprimida como gas natural comprimido (GNC), como combustible marino o para camiones en forma licuada como gas natural licuado (GNL). Además de su utilización como vector energético, el gas natural también se utiliza como reactivo en procesos químicos como la síntesis de amoníaco en el proceso Haber-Bosch (fertilizante de nitrógeno), reducción de mineral de hierro en el proceso en un alto horno y en la producción de hidrógeno.

El poder calorífico del gas natural se sitúa normalmente entre 8,6 y 11,4 kWh por metro cúbico estándar (Nm<sup>3</sup>), basado en un volumen a 0°C y una presión de 1.013 mbar. En comparación, un litro de gasóleo para calefacción proporciona unos 10 kWh de energía.

Puesto que actualmente se está promoviendo su uso por razones ambientales y de política energética, está sujeto a un tipo impositivo menor que los productos derivados del petróleo que se utilizan con la misma finalidad.

## Zonas ECA

El convenio MARPOL, establece una serie de limitaciones en ciertas zonas protegidas del globo. Para este cometido, la contaminación de los gases  $SO_x$  viene regulada por la regla 14 del Anexo VI de este convenio. Pero, a partir del 2020, estas zonas siguen siendo reconocidas como zona ECA, pero la limitación a nivel global ya no permite el consumo de combustibles pesados con un contenido superior al 0,1 % de Azufre.

Adopción, entrada en vigor y fecha en la que pasan a tener efecto las zonas especiales			
Zonas especiales	Adopción #	Entrada en vigor	Con efecto desde
<b>Anexo I: Hidrocarburos</b>			
mar Mediterráneo	2 nov 1973	2 oct 1983	2 oct 1983
mar Báltico	2 nov 1973	2 oct 1983	2 oct 1983
mar Negro	2 nov 1973	2 oct 1983	2 oct 1983
mar Rojo	2 nov 1973	2 oct 1983	*
zona de los Golfos	2 nov 1973	2 oct 1983	1 ago 2008
golfo de Adén	1 dic 1987	1 abr 1989	*
zona del Antártico	16 nov 1990	17 mar 1992	17 mar 1992
aguas noroccidentales de Europa	25 sept 1997	1 feb 1999	1 ago 1999
zona de Omán del mar Árabe	15 oct 2004	1 en 2007	*
aguas meridionales de Sudáfrica	13 oct 2006	1 mar 2008	1 ago 2008

Tabla 2 Fechas de adopción y entrada en vigor de las zonas ECA. Fuente: [www.imo.org](http://www.imo.org)

<b>Anexo II: Sustancias nocivas líquidas</b>			
zona del Antártico	30 oct 1992	1 jul 1994	1 jul 1994
<b>Anexo IV: Aguas sucias</b>			
zona del mar Báltico	15 jul 2011	1 en 2013	**
<b>Anexo V: Basuras</b>			
mar Mediterráneo	2 nov 1973	31 dic 1988	1 may 2009
mar Báltico	2 nov 1973	31 dic 1988	1 oct 1989
mar Negro	2 nov 1973	31 dic 1988	*
mar Rojo	2 nov 1973	31 dic 1988	*
zona de los Golfos	2 nov 1973	31 dic 1988	1 ago 2008
mar del Norte	17 oct 1989	18 feb 1991	18 feb 1991
zona del Antártico (al sur del paralelo 60° S)	16 nov 1990	17 mar 1992	17 mar 1992
región del Gran Caribe, incluidos el golfo de México y el mar Caribe	4 jul 1991	4 abr 1993	1 may 2011
<b>Anexo VI: Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques (zonas de control de las emisiones)</b>			
mar Báltico (SO <sub>x</sub> )	26 sept 1997	19 may 2005	19 may 2006
mar del Norte (SO <sub>x</sub> )	22 jul 2005	22 nov 2006	22 nov 2007
ECA de Norteamérica (SO <sub>x</sub> y materia particulada)	26 mar 2010	1 ago 2011	1 ago 2012
(NO <sub>x</sub> )	26 mar 2010	1 ago 2011	***
ECA del mar Caribe de los Estados Unidos (SO <sub>x</sub> y materia particulada)	26 jul 2011	1 en 2013	1 en 2014
(NO <sub>x</sub> )	26 jul 2011	1 en 2013	***

Tabla 3 Fechas de aprobación y entradas en vigor de varias normativas en las zonas ECA. Fuente: [www.imo.org](http://www.imo.org)

El hecho más destacable que debemos tener en cuenta es que, a partir del año 2020, el máximo porcentaje de azufre permitido en el fueloil pesado pasa de ser 3,5 % al 0,1 %. El salto es de gran importancia y obliga a todas las compañías a llevar a cabo algún tipo de medida para poder mantener la operatividad de sus buques. Esto puede ser tanto usar MDO, instalar un sistema de limpieza de gases o scrubber; o bien, la readaptación de la instalación del buque para que sea capaz de consumir gas natural licuado (GNL).

Debemos tener en cuenta que la demanda mundial del HFO es actualmente de alrededor de 3 millones de barriles por día. Cantidad que, a partir de la entrada en vigor de esta nueva normativa, deberá ser destilada, o bien, encontrar nuevos consumidores para este combustible que no sean los buques.

En este sentido, las navieras han tenido que decidirse sobre el futuro de sus buques, ya que ahora la nueva normativa IMO ha entrado en vigor y las actualmente el límite de azufre permitido es del 0,1% mundialmente. El primer grupo en adoptar las medidas para afrontar esta nueva situación, fue Carnival Corporation & plc, el grupo con más barcos del tipo crucero.

Este grupo empezó con la instalación de limpiadores de gases en sus buques construidos alrededor del 2007-08, uso exclusivo de MDO en los buques más antiguos y, los buques bajo pedido y los más nuevos de la flota, con instalaciones que permitan ser propulsados totalmente por GNL.

## Contaminación mundial

Para poder empezar a crear una perspectiva más enfocada hacia el caso los buques, vamos a estudiar primero el proceso químico que ocurre en la cámara de combustión del motor de combustión interna de un automóvil cotidiano.

El escenario para el motor de combustión interna de un automóvil es el siguiente:

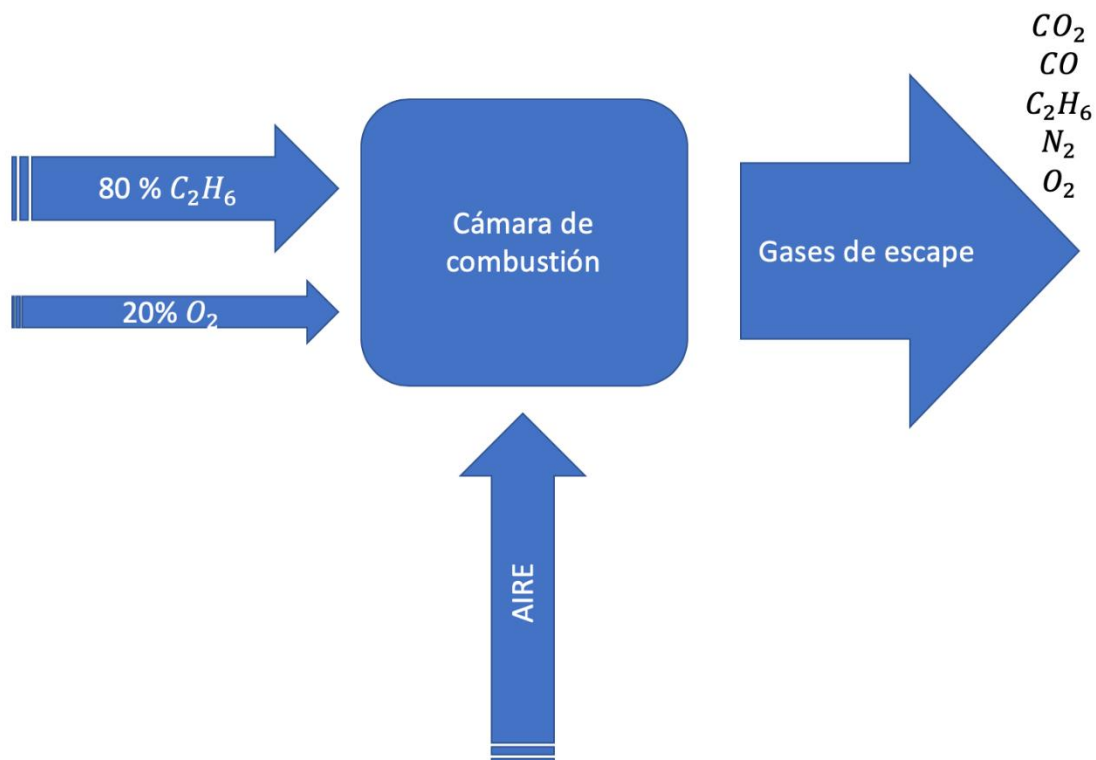


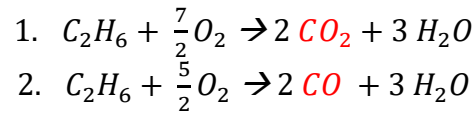
Ilustración 2 Representación de la reacción que define la combustión interna del motor.  
Fuente: [www.esss.co](http://www.esss.co)



De manera que, las diferentes partes que eran en la cámara de combustión son:

1. 80 % combustible ( $C_2H_2$ ) + 20%  $O_2$
2. Aire
  - a. 78 %  $N_2$
  - b. 21%  $O_2$
  - c. 1% otros gases

Las reacciones químicas que se llevan a cabo en el interior de esta cámara de combustión son:



Conclusiones:

1. Los gases contaminantes predominantes en el escape son:
  - a. **Dióxido de carbono**
  - b. **Monóxido de carbono**
2. Por cada 1 Mol de combustible, obtenemos, en el escape, 2 Mol de Dióxido de Carbono o Monóxido de Carbono (dependiendo del número de oxidación del carbono)

Una vez conocido el proceso químico, es importante conocer la cantidad de automóviles que existen actualmente en el mundo.

Teniendo en cuenta que en 2010 se superó la cantidad de 1000 millones de automóviles en circulación y, que, en 2004, solamente existían 700 millones de automóviles. Vemos un crecimiento importante anual en la cantidad de vehículos en circulación, ya que las previsiones más actuales estiman la cantidad de coches alrededor de los 1400 millones. Este dato es importante ya que nos ayuda a la contextualización de todo el razonamiento.






Audi A3 Sportback 1.6 FSI Ambition		
		<a href="#">Jetzt mtl. Rate erfahren</a>
		<a href="#">Zur Preisbewertung</a>
		<a href="#">Händler-Finanzierung</a>
		<a href="#">Jetzt mtl. Rate erfahren</a>
Finanzierung		
Fahrzeugzustand 		Unfallfrei
Kategorie		Limousine
Kilometerstand		223.000 km
Hubraum		1.598 cm <sup>3</sup>
Leistung		85 kW (116 PS)
Kraftstoffart		Benzin
Verbrauch 		ca. 6,8 l/100km (kombiniert) ca. 9,0 l/100km (innerorts) ca. 5,5 l/100km (außerorts)
CO <sub>2</sub> -Emissionen		ca. 163 g/km (kombiniert)
Anzahl Sitzplätze		5
Anzahl der Türen		4/5
Getriebe		Schaltgetriebe
Schadstoffklasse 		Euro4
Umweltplakette		4 (Grün)
Erstzulassung		08/2007
Anzahl der Fahrzeughalter		3
HU		Neu
Klimatisierung		Klimaautomatik
Airbags		Front-, Seiten- und weitere Airbags

Ilustración 3 Especificaciones del coche elegido como modelo de análisis. Fuente: [www.mobile.de](http://www.mobile.de)

El escenario que simularemos para poder

tener una base de comparación, será el de un coche standard, en este caso, un Audi A3 del 2007.

La contaminación media emitida por este vehículo es 163 g de  $CO_2$ /km. Así que, si consideramos que todos los vehículos del mundo son iguales a este, esto supondría un total de 0,2282 toneladas de  $CO_2$  /km.

Por lo que hace a la cantidad de km recorridas anualmente en coche, la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), hizo el siguiente estudio, donde vemos la cantidad media de km recorridos en cada país:

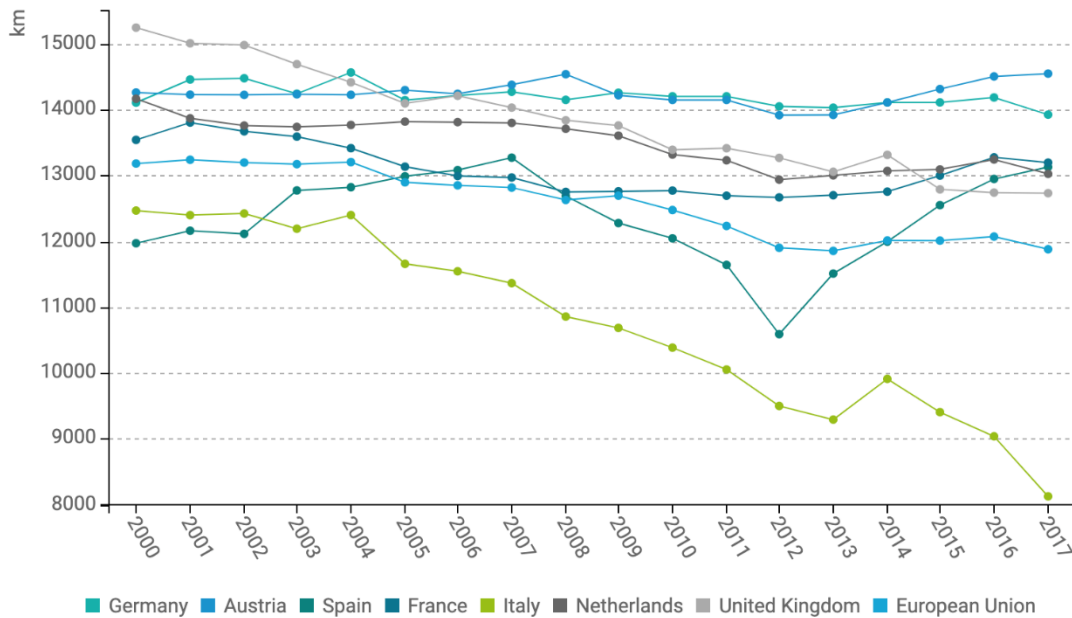


Ilustración 4 Cantidad de Km recorridos anualmente en coche, por países. Fuente: EEA.

Para el caso que queremos simular, cogeremos los kilómetros que se recorrieron en España durante el 2017. En este caso sería de 13.127 km.

$$1400 \text{ millones de coches} * \frac{163 \text{ g}}{\text{km}} * \frac{13127 \text{ km}}{\text{año}} = 3 \frac{\text{toneladas de } CO_2}{\text{año}}$$

Por lo que hace a la calidad del aire en España, más específicamente en Barcelona, vemos que actualmente se encuentra alrededor de los 150 partes por billón, la cantidad de CO en aire.

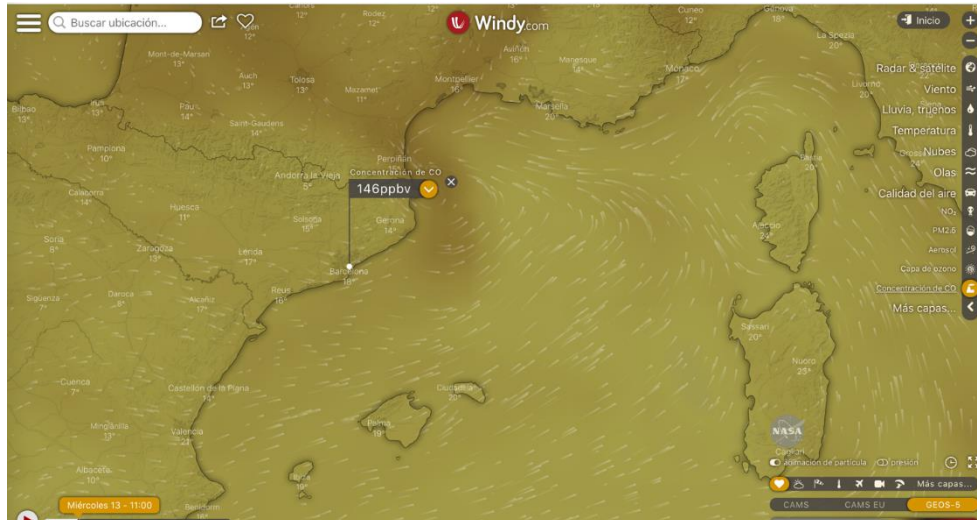


Ilustración 5 Cantidad de CO en el aire sobre el mar mediterráneo. Fuente: [www.windy.com](http://www.windy.com)

Una vez llegada a la conclusión final sobre la contaminación anual producida por los vehículos destinados al transporte terrestre, a continuación, vamos a hacer el mismo razonamiento para los buques.

Primeramente, vamos a presentar el combustible que estudiaremos y las características que hacen que haya sido el combustible usado en los buques, que viene definido en la hoja de características entregada antes de iniciar el proceso de bunkering de combustible:



<b>COMBUSTIBLE BÚNKER</b>	<b>ICSC: 1774</b>
Fueloil nº6 Combustible búnker C Ver notas	<b>Junio 2015</b>
<b>CAS: 68553-00-4</b>	
<b>Nº ONU: 3082 ()</b>	
<b>CE: 271-384-7</b>	

	<b>PELIGROS</b>	<b>PREVENCIÓN</b>	<b>LUCHA CONTRA INCENDIOS</b>
<b>INCENDIO Y EXPLOSIÓN</b>	Combustible.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	En caso de incendio en el entorno: están permitidos todos los agentes extintores.

**¡HIGIENE ESTRICTA!**

	<b>SÍNTOMAS</b>	<b>PREVENCIÓN</b>	<b>PRIMEROS AUXILIOS</b>
<b>Inhalación</b>	Vértigo. Dolor de cabeza. Tos.	Evitar la inhalación de vapor. Usar protección respiratoria.	Aire limpio, reposo.
<b>Piel</b>	Piel seca. Enrojecimiento.	Traje de protección. Guantes de protección.	Aclarar y lavar la piel con agua y jabón.
<b>Ojos</b>	Enrojecimiento. Picor.	Utilizar protección ocular en combinación con protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
<b>Ingestión</b>		No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo. Lavarse las manos antes de comer.	Proporcionar asistencia médica si se siente mal.

<b>DERRAMES Y FUGAS</b>	<b>CLASIFICACIÓN Y ETIQUETADO</b>
Protección personal: guantes de protección y gafas de protección de montura integral. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente. Recoger la sustancia derramada en recipientes. Almacenar y eliminar el residuo conforme a la normativa local.	<b>Conforme a los criterios del GHS de la ONU</b>
<b>ALMACENAMIENTO</b>	

Medidas para contener el efluente de extinción de incendios. Almacenar en un área sin acceso a desagües o alcantarillas.

**ENVASADO**



Puede provocar cáncer  
Puede provocar daños en el sistema nervioso central  
Puede provocar daños en los pulmones tras exposiciones prolongadas o repetidas  
Tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos

**Transporte**  
**Clasificación ONU**  
Clase de Peligro ONU: 9; Grupo de Embalaje/Envase ONU: III



Organización Internacional del Trabajo



Organización Mundial de la Salud

La información original ha sido preparada en inglés por un grupo internacional de expertos en nombre de la OIT y la OMS, con la asistencia financiera de la Comisión Europea.  
© OIT y OMS 2018



European Commission

**COMBUSTIBLE BÚNKER**

**ICSC: 1774**

**INFORMACIÓN FÍSICO-QUÍMICA**

**Estado físico; aspecto**

LÍQUIDO OSCURO VISCOSO DE OLOR ACRE.

**Peligros físicos**

**Peligros químicos**

Reacciona con oxidantes. Esto genera peligro de incendio.

Punto de ebullición: 200-400°C  
Punto de fusión: -46°C  
Densidad (a 20°C): 0.96 g/ml  
Punto de inflamación: 62-174°C  
Temperatura de autoignición: 407°C  
Solubilidad en agua: ninguna  
Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 2.7-7.1 (estimado)

**MEDIO AMBIENTE**

Esta sustancia se libera normalmente al medio ambiente; no obstante, debería evitarse cuidadosamente cualquier entrada adicional, p. ej. por una eliminación inadecuada.


<b>INFORMACIÓN ADICIONAL</b>		<p>La calidad y exactitud de la traducción o el posible uso que se haga de esta información no es responsabilidad de la OIT, la OMS ni la Comisión Europea. © Versión en español, INSST, 2018</p>
<p>- Nº de índice (clasificación y etiquetado armonizados conforme al Reglamento CLP de la UE): 649-030-00-1 - <b>Clasificación UE</b> Pictograma: T; R: 45; S: 53-45</p>		
		

Ilustración 6 Documento entregado a los buques en cada operación de carga de combustible. Fuente: [www.galpenenergía.es](http://www.galpenenergía.es)

Por lo que hace a la fórmula química del HFO, debemos tener en cuenta que, generalmente, se trata de una mezcla compleja constituida por:

- **Hidrocarburos sólidos**, como parafinas disueltas en la matriz hidrocarbonada
- **Hidrocarburos líquidos**, con una cantidad de átomos de carbono comprendido entre 20 y 70
- **Asfaltenos** o componentes de alto peso molecular, sólidos cuando están aislados, pero peptizados en la parte aromática de dicha matriz.
- Pequeñas cantidades de **agua disuelta** y residuos sólidos inorgánicos
- **Metales** presentes en las moléculas más pesadas de asfaltenos, principalmente: Níquel, Vanadio y hierro formando compuestos organometálicos.
- **Compuestos de azufre**, en muy variada forma. Los sulfuros, sulfonas, sulfóxidos y tiofenos, son los más frecuentes.

## El proceso de combustión:

La combustión es una reacción química de oxidación rápida, que consiste en la unión de un material combustible con un comburente y una energía de activación aportada por el calor suministrado al FO. Esta reacción es exotérmica, siendo acompañada por desprendimiento de calor y habitualmente emisión de luz. La velocidad de esta combustión y la integridad de la reacción, dependen de la afinidad que presente el combustible con el oxígeno y de las condiciones en las que se lleva a cabo la combustión (tiempo, temperatura, grado de contacto entre la masa del FO y el oxígeno; y el grado de turbulencia existente en la mezcla de ambos.)

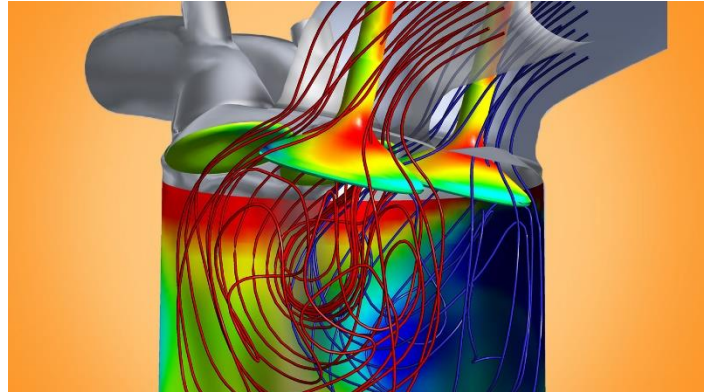
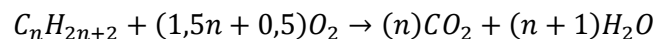


Ilustración 7 Representación de presiones y flujo de los gases después de la combustión. Fuente: [www.esss.co](http://www.esss.co)

Los gases de escape resultantes de la combustión son:

- $CO_2$
- $CO$
- $O_2$
- $N_2$
- $SO_2$
- Partículas sólidas constituidas por átomos de carbono inquemados
- Sulfatos metálicos
- Agua emulsionada con hidrocarburos de alto peso molecular (difíciles de quemar)

Recordemos la reacción general de combustión de un hidrocarburo parafínico:



A continuación, analizamos las reacciones individuales que se llevan a cabo:

- Productos de la combustión de carbono
  - $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$



- $CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$
- Productos de la combustión del hidrógeno
  - $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$
- Productos de la combustión de azufre
  - $S + O_2 \rightarrow SO_2$ 
    - Reacción que puede darse a continuación (Principalmente dependiendo de la temperatura)
      - $SO_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow SO_3$
      - $SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$
- Productos de la combustión del nitrógeno
  - $N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$
  - $2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$
- Productos de la combustión del vanadio
  - $VO_{(gas)} + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow VO_{2(gas)}$
  - $2VO_{2(gas)} \rightarrow V_2O_{3(liq)} + \frac{1}{2}O_2$
  - $2VO_{2(gas)} \rightarrow V_2O_{4(liq)}$
  - $V_2O_3 + O_2 \rightarrow V_2O_5$
  - $V_2O_4 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow V_2O_5$

De esta manera, concluimos que, en las reacciones que nos ocupan, aparece el Azufre como elemento muy importante, pero también aparecen otros gases como el Nitrógeno y el Vanadio.

## ¿Cómo afectan estos elementos químicos a la atmósfera?

### Azufre:

Como resultado de la combustión se genera el dióxido de azufre como contaminante primario. El trióxido de azufre se forma en la atmósfera, como contaminante secundario, por la acción fotoquímica sobre el anhídrido sulfuroso, así como el ácido sulfúrico que se produce por la oxidación catalítica de los

El hecho de que exista Azufre en el combustible, hace que, al reaccionar con el oxígeno, produzca dióxido de azufre. Este puede resultar en  $SO_3$  (trioxido de azufre) y, acabar siendo  $H_2SO_4$  (ácido sulfúrico).



Por lo que hace a la contaminación producida por la presencia de azufre en el combustible, destacaremos la acidificación del medio ambiente, que es la pérdida de la capacidad de neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra en forma de ácidos y de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera.

La lluvia ácida es el caso más conocido, pero también se produce acidificación en precipitaciones en forma de nieve, rocío o nieblas.

### **Vanadio:**

La información sobre el efecto clastogénico de los compuestos de vanadio es muy poca y controversial, mientras que los datos sobre su potencial mutagénico y genotóxico en sistemas bacterianos, en levaduras y en plantas son poco concluyentes.

Por otro lado, los resultados obtenidos con células de mamífero, tanto in vitro como in vivo indican que los compuestos de vanadio tienen efectos mutagénicos y genotóxicos, aunque la acción más evidente de estos compuestos es la alteración de la función de los microtúbulos y consistentes efectos citotóxico y citostáticos. Por tales razones algunos autores, consideran al vanadio como un mutágeno débil.

De manera que, concluimos que, aunque las proporciones de  $CO$  y  $CO_2$  emitidas por los buques sean mayores a las de los vehículos, si consideramos la masa que se mueve y la eficiencia en el trabajo (un carguero, en 1 año solo viaje podría cargar más que cualquier otro tipo de transporte terrestre, durante su vida útil), la contaminación por generada por el  $CO_2$  y  $CO$  es muy inferior, proporcionalmente, a la del vehículo terrestre.

Pero en este caso surgen otros contaminantes que son el Vanadio y el Azufre, que comentaremos en capítulos posteriores la manera de reducirlos al máximo, llegando a niveles que lo hacen prácticamente inexistente.

### ***El Scrubber***

Para el sector marítimo, el 1 de enero de 2020 es considerado punto de inflexión debido a las nuevas regulaciones de la organización marítima internacional. Que, reduce el máximo de azufre permitido en los gases de escape de las embarcaciones que operen pasada esta fecha.

Como hemos comentado anteriormente, este límite es reducido un 90% respecto al valor máximo que existía antes.

Entonces, ante esta nueva situación, surge la opción de instalar un sistema encargado de la limpieza de los gases de escape. De esta manera, se permitiría seguir usando el combustible que se usaba con anterioridad. Ya que, teniendo en cuenta que en algunos casos el cambio de combustible puede significar un cambio en la eficiencia del motor.

Dado el hecho de que la normativa no es posible cambiarla, debemos hacer un primer estudio del buque que opera sin scrubber hasta el momento. Para poder ver si es posible la instalación de limpiador de gases en este caso.

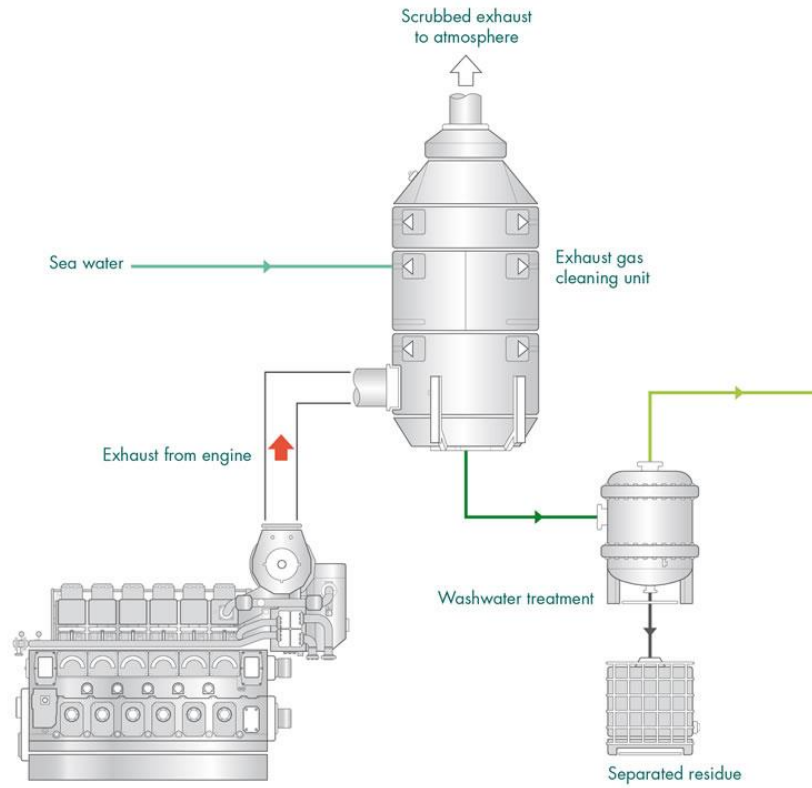
Cabe destacar que, los buques que vayan a incorporar este nuevo elemento a bordo, deben cumplir con las siguientes características:

1. Disponen de espacio en el embudo para la instalación del scrubber y permitir que se pueda rociar agua, ya sea de mar o agua dulce, en la parte superior del scrubber.
2. Espacio para la planta de purificación del agua de lavado
3. Almacenamiento disponible para el lodo que sale del proceso de purificación del agua de lavado. Este lodo debe mantenerse a bordo y disponerlo a las facilidades pertinentes en tierra. No está permitido quemarlo en el incinerador.

Tipos de circuitos de Scrubber:

- Circuito abierto
- Circuito cerrado
- Circuito híbrido

Principio de funcionamiento



*Il·lustració 8 Components principals del limpiador de gases de escape.  
Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems*

## Sistema de circuito abierto

El sistema de circuito abierto, consiste en el siguiente proceso:

1. Los gases de escape entran por la parte inferior del scrubber

2. Hay un sistema de pulverizadores con agua de mar en la parte superior del scrubber que entran en funcionamiento.

3. El agua contaminada cae a la parte inferior del limpiador de gases y este acaba en un sistema de tratamiento del agua, que suele ser una purificadora. Esta acabará descargando al mar el agua que cumpla con las condiciones exigidas por el MARPOL y, el resto que no cumpla, se almacenará en un tanque aparte. Para luego descargarlo a las facilidades pertinentes que existen en tierra.

4. El agua que sale de la purificadora hacia el mar, a su vez, es diluida con el agua de mar que sale de los enfriadores del circuito de baja temperatura de los motores del buque, con el objetivo de la eliminación de  $SO_2$ .

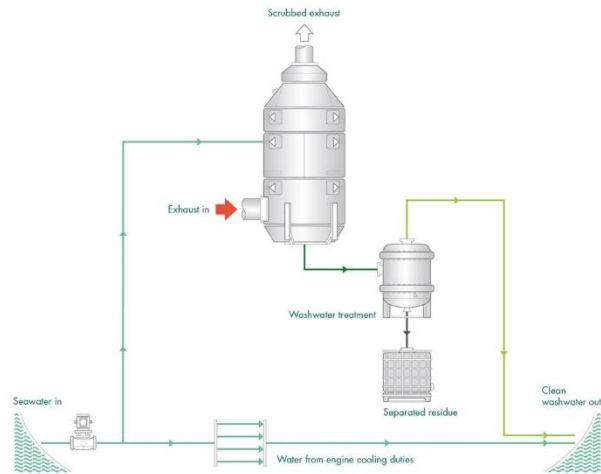


Ilustración 9 Sistema de circuito abierto.  
Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems

Por lo general, los sistemas de agua de mar abiertos utilizan 45 m<sup>3</sup> / MW h para el lavado.

## Sistema con circuito cerrado

La variante opuesta al sistema abierto, es el llamado sistema con circuito abierto. En este caso, el agua dulce tratada con sustancia química alcalina, como la sosa cáustica, es utilizada para la neutralización y depuración.

Posteriormente, esta agua que ha sido utilizada para el lavado es dirigida a un tanque de tratamiento o bien colector. De aquí se extrae una parte que se purifica y dependiendo de las condiciones del agua después de ser tratada, puede enviarse a un tanque colector final, y mantenerse a bordo hasta que se descargue a las facilidades que existen en tierra. O bien, se puede descargar al mar si las condiciones del agua cumplen las regulaciones establecidas por el MARPOL.

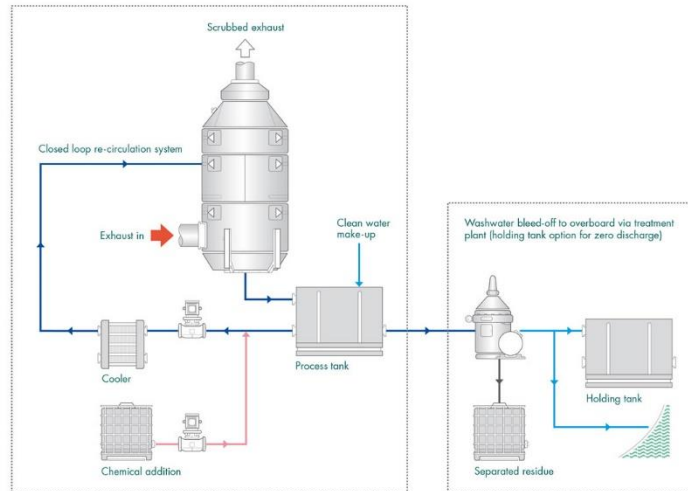


Ilustración 10 Sistema de circuito cerrado.  
Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems

A parte de este tanque colector que hemos nombrado anteriormente, debemos tener en cuenta que la purificadora, por definición, separa la parte limpia de la suciedad, por lo tanto, dispone de un tanque donde descarga toda la suciedad extraída del agua.

Por lo general, los sistemas cerrados de agua dulce tienen una velocidad de descarga de 0.1 a 0.3 m<sup>3</sup> / MW h, aunque el sistema que se muestra puede funcionar con descarga cero durante períodos limitados.

## Sistemas híbridos

Finalmente, tenemos el caso que tiene disponibles ambos circuitos que hemos nombrado anteriormente. Esta variante se conoce como el sistema híbrido, ya que dispone de los componentes del sistema abierto y del cerrado, pudiendo operar en cualquiera de las dos variantes, dependiendo de las necesidades o elección del operador.

En este caso, lo que destacaremos es que tenemos, tanto la línea de agua dulce como la del agua salada del enfriador de baja temperatura de los motores, que interviene en la operación del scrubber. Esto es así ya que el limpiador de gases puede operar con agua dulce o salada, dependiendo de la modalidad que elija el operador.

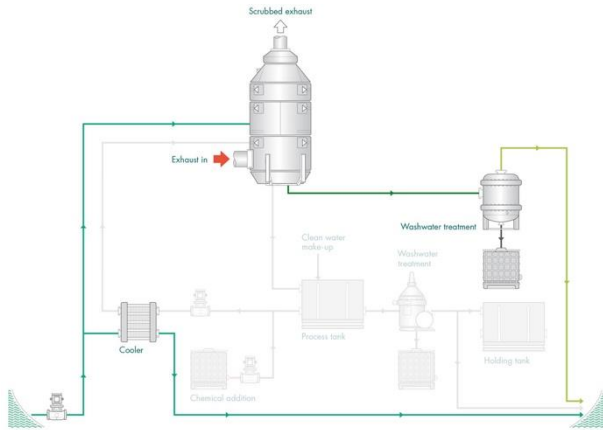


Ilustración 11 Sistema híbrido en configuración abierta.  
Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems

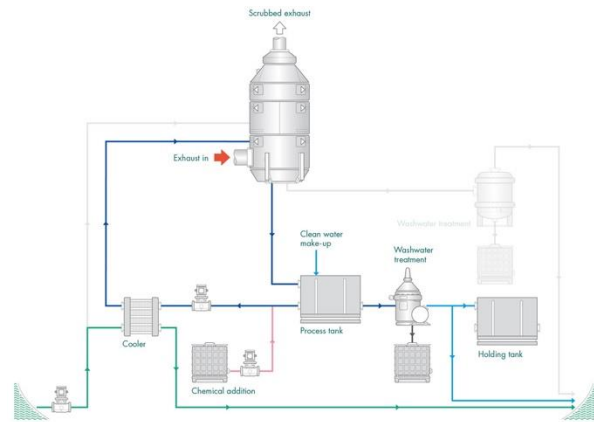


Ilustración 12 Sistema híbrido en configuración cerrada.  
Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems

## Partes importantes del scrubber

### Sistema abierto

Las partes más importantes del sistema abierto de limpieza de gases son:

#### 1. Scrubber

El scrubber es la parte principal del sistema y su función es la separación de estos gases dañinos para el medio ambiente, como son los  $SO_x$  y  $NO_x$ .

El modo de operación de este componente se basa en la introducción de los gases de escape por la parte inferior. Dependiendo de la marca y el modelo la introducción de los gases puede variar, pero en general los gases de escape son introducidos por la parte inferior de uno de los lados.

Los gases, al entrar, se encuentra con dos tramos en los que hay pulverización de agua de mar o agua tratada químicamente y el contacto de ambos hace que el agua se contamine con el azufre y el carbono, cayendo finalmente a la parte inferior del scrubber. Para, dirigirse al tanque de tratamiento de aguas.

## 2. Tanque de tratamiento de agua

Al tanque de tratamiento de aguas llega toda el agua residual que sale del scrubber. Es decir, agua contaminada con el azufre y carbono, mayoritariamente. A partir de aquí, como se trata de un sistema abierto, se lleva a cabo la separación del agua más contaminante hacia un tanque específicamente para los residuos contaminantes, y, el agua que cumpla con las restricciones definidas por el MARPOL VI, se descargará al mar.

## 3. Tanque para residuos contaminantes

Cuando se lleva a cabo la separación del agua que puede ir finalmente al mar y el que no, debemos garantizar que no haya contacto entre ambas en ninguno de los casos, de manera que se dispone de un tanque específicamente para la parte contaminada y que no cumple con las normas definidas por MARPOL VI. Este tanque es únicamente para el almacenamiento y posteriormente proceder a su descarga a las facilidades en tierra.

### Sistema cerrado

Por lo que hace al sistema cerrado, a parte de los elementos del sistema abierto, se dispone de los siguientes componentes adicionales:

#### 1. Purificadora

La purificadora en este caso es idéntica a cualquier purificadora de aceite o de combustible que podemos encontrar a bordo de los buques.

El funcionamiento de la purificadora viene dividido en varias etapas, cuyo objetivo es la separación de los residuos existentes en el agua que procede del scrubber, para así, enviarla a un tanque de almacenamiento o bien el mar, en caso de ser necesario.

La operación de las purificadoras o depuradoras se basa en la fuerza centrípeta generada al girar sobre un eje a altas revoluciones por minuto. En ese caso, los residuos tienen una masa superior al agua limpia, por lo que se van depositando en las paredes de la depuradora, para ser finalmente descargados al tanque de lodos.



a. Tanque de lodos

Cada proceso de limpieza acaba con una descarga de todos los residuos a un tanque de lodos específicamente para la depuradora.

b. Tanque de almacenamiento

El agua limpia que ha pasado por todo el proceso, será depositada en un tanque de almacenamiento, para también ser descargado a tierra, a las instalaciones pertinentes.

2. Tanque de químicos

a. Bomba de dosificación de la química

Por lo que hace al sistema que opera con agua dulce, después de la pulverización y el contacto con los gases contaminantes, el agua se acidifica, por lo que se necesita unos químicos adicionales para poder recircular el agua.



## Normativa de la IMO respecto al uso de sistemas EGCS

### Contextualización de la normativa

El desarrollo del texto regulatorio del comité de protección del medio ambiente marino o Marine Environmental protection committee (MEPC), como parte de la OMI, primeramente, en 1973 y posteriormente modificado en 1978 (MARPOL convention). Finalmente 1997 se añade el Anexo VI, que contempla la contaminación del aire producida por barcos.

El Anexo VI tarda 7 años en entrar en vigor, ya que 2005 no se cumple con el requisito de firmas y peso. esta manera el 19 de mayo de 2005 entra en vigor nuevo anexo y con ello se reducen los efectos perjudiciales de las emisiones de SO<sub>x</sub> sobre la salud humana y el medio ambiente. Además, dentro de este destacamos la regla 14, la cual introduce un límite mundial sobre la cantidad de azufre permitida para combustibles marinos, limitándose a 4,5 % y en las de emisiones controladas (SECA's) a 1,5%.

Por lo que hace a las zonas ECA, la primera zona que inauguró la lista de ECA's fue el Mar Báltico y posteriormente el 22 de noviembre de 2008 de incluyó al Mar del Norte /canal inglés (english channel), a través de la adopción de la resolución MEPC-132 (53) de la OMI.

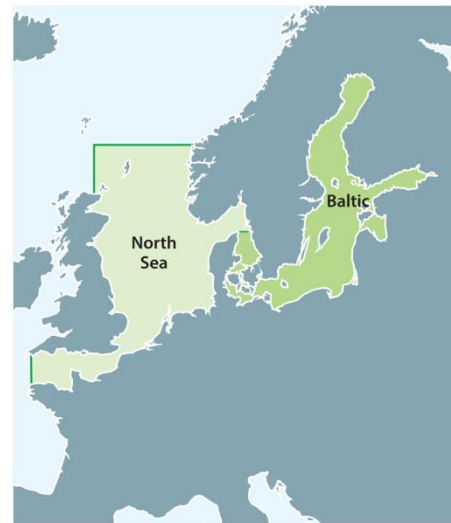


Ilustración 13 Áreas ECA en el norte de Europa. Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems

hasta  
De  
este  
  
anexo  
  
los  
zonas

En octubre del 2008, durante la 58ª IMO MEPC, se introduce una nueva limitación del azufre a nivel mundial, el cual pasa a ser del 3,5% a partir del 1 de enero del 2012 y a 0,5% a partir del 1 de enero del 2020. Esta limitación para el 2020, queda pendiente revisarse en 2018, ya que esta limitación depende de la disponibilidad de combustible para cumplir con la normativa y de esta manera se determinaría si la entrada en vigor sería en el 2020, como estaba previsto, o bien se extiende hasta 2025 como máximo.

Esta actualización del anexo VI también introduce una nueva etapa intermedia anterior al 2012 y se trata de la limitación al 1.0 % el contenido máximo de azufre en las zonas ECA, que se aplicaría a partir del día 1 de julio de 2010. Pero, realmente, el cambio más destacable sería la limitación al 0,1% de azufre en las zonas ECA, a partir del 1 de enero de 2015, 5 años antes de lo que se había estipulado en el modelo original.

De manera que el proceso de limitación del % de azufre en los fueloils marinos siguió la siguiente tabla:

	Zonas ECA	Resto del mundo
<b>Límites iniciales</b>	1,5 %	4,5 %
<b>1 julio 2010</b>	1,0%	4,5 %
<b>1 enero 2012</b>	1,0 %	3,5 %
<b>1 enero 2015</b>	0,1 %	3,5 %
<b>1 enero 2020</b>	0,1 %	0,5 %

Tabla 4 Resumen de las diferentes etapas restrictivas. Fuente: [www.imo.org](http://www.imo.org)

## Regulaciones locales y regionales

### Unión europea

En la unión europea, a parte de los controles implementados por el Anexo VI, se han añadido una serie de normas adicionales bajo las directivas sobre el uso de combustibles con bajo azufre, Dir. 1999/32/EC, que fue modificada por la dir. 2005/33/EC y la 2009/30/EC. Esta, obligó al uso de combustibles con un máximo de azufre del 0,1% en todos los puertos europeos a partir del 1 de enero de 2010.

La directiva también permite que se usen otros sistemas para la reducción de las emisiones durante un tiempo de prueba máximo de 18 meses, o bien la instalación de un sistema de limpieza de gases, con una monitorización continua de los parámetros de emisiones, para evidenciar que se cumple con la normativa de emisiones.

Esta directiva fue finalmente sustituida por la dir. 2012/33/EC, para poder estar en cumplimiento de las nuevas regulaciones de la OMI, que, como hemos comentado anteriormente, limitan el porcentaje de azufre al 0,5% fuera de las zonas ECA para el 2020. Además de considerar apto el uso de los sistemas de limpieza de gases únicamente en modo cerrado y con monitorización continua.

## Estados Unidos

En el caso estadounidense, la herramienta usada para el establecimiento de diferentes normativas es el CFR o “Code of Federal Regulations”. En este caso se adoptan las limitaciones establecidas por el anexo VI del MARPOL, a través del título 40 del CFR.

La parte 1043 del título 40 del CFR se destina al control de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> i emisiones PM. Esta normativa aplica a todos los buques de bandera americana, indiferentemente de la zona del mundo donde estén operando, o bien, sobre todos los buques que operen en aguas de los estados unidos de américa o en su zona exclusiva económica (EEZ).

Según esta norma, se permite el uso de los sistemas de limpieza de gases, pero eso no descarta alguna limitación adicional, sobretodo, para reducir la contaminación del mar. Pero, en estados unidos, debemos destacar el estado de California, ya que en este estado tenemos la autoridad que regula la contaminación del aire en esta zona y esta es conocida como la CARB, o bien, “California Air Resources Board”. Lo que destacamos de la CARB es que no autoriza específicamente el uso de sistemas alternativos al consumo de combustibles de bajo contenido de azufre, pero sí que ha permitido el uso de los sistemas de limpieza de gases de escape en alguna ocasión, simplemente por motivos de prueba, por lo que, se recomienda a todos los buques que tengan previsto usar el scrubber en estas áreas, se pongan en contacto con las autoridades californianas anteriormente.

El CFR distingue entre 3 tipos de motores, en función del desplazamiento del cilindro:

1. Motores con un desplazamiento menor a 5 litros
2. Motores con un desplazamiento de entre 5 y 30 litros
3. Motores con un desplazamiento mayor o igual a 30 litros

Las categorías 1 y 2 tienen una serie de limitaciones adicionales respecto a las emisiones de HC’s y CO’s, de la misma manera que existe una limitación de PM para estas categorías. La categoría 3 de motores no dispone de una limitación exacta por lo que hace a PM, pero el enfoque hacia estas emisiones ha sido a través de la relación directamente proporcional a las emisiones de SO<sub>x</sub>, por lo que el uso de combustibles de bajo contenido de azufre hace que reduzcamos las PM.



Ilustración 14 Zona ECA en la costa californiana. Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems.

Otra limitación restrictiva de la CARB es la obligación del uso de combustibles de bajo contenido de azufre, desde una distancia de 24 millas náuticas respecto a la costa californiana más cercana al buque.

Fuel Requirement	Effective Date	CARB's California OGV Fuel Requirement Percent Sulfur Content Limit
Phase I	July 2009	Marine Gas Oil (DMA) at or below 1.5% sulfur; or Marine Diesel Oil (DMB) at or below 0.5% sulfur
	August 2012	Marine Gas Oil (DMA) at or below 1.0% sulfur; or Marine Diesel Oil (DMB) at or below 0.5% sulfur
Phase II	January 2014	Marine Gas Oil (DMA) at or below 0.1% sulfur; or Marine Diesel Oil (DMB) at or below 0.1% sulfur

Table 5 Restricciones de la costa californiana. Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems.

## Normativa internacional

### Guía de la OMI para los sistemas de limpieza de gases de escape

La creación de los sistemas de limpieza de gases fue motivada, principalmente, por la limitación de las emisiones de  $SO_x$  a 6 kg/kWh por el Anexo VI del MARPOL, para los sistemas que cumplen con las regulaciones previamente definidas por la OMI.

En el 2009 se define una guía para los sistemas de limpieza de gases, las cuales fueron adoptadas a partir del 17 de julio de 2009. A partir de este momento, se definen procedimientos para la monitorización de las emisiones  $SO_2/CO_2$ , dependiendo del porcentaje de azufre en el combustible, con los cuales se da una equivalencia a las limitaciones anteriormente descritas como son las 14.1 y la 14.2 del MARPOL.

En la revisión de 2008 del anexo VI, se decide eliminar la referencia específicamente los EGCS de la regla 14 y incorporar la aprobación del sistema de limpieza en la regla 4, como equivalente. De esta manera, se pasa a requerir a la administración de la bandera del buque a tener en cuenta cualquier pauta definida por la OMI respecto a los sistemas de limpieza de gases a bordo del buque, además de notificar a la OMI de los detalles de tales pautas en cada caso concreto.

Es importante puntualizar que las pautas de 2009 no son reglas de obligado cumplimiento ni son definitivas, ya que la experiencia con estas instalaciones, hará que se vayan creando nuevas pautas. Pero, se sobreentiende que las instalaciones que cumplan con las recomendaciones definidas por la OMI son más susceptibles a ser aceptadas, pero siempre quedará en manos de la administración de la bandera del buque, ya que se hace un estudio para cada caso particular.

En el caso de las pautas del 2009, el asunto más delicado y con mucho por definir, es el agua de lavado. Según el Apéndice III de las pautas, se debe recolectar los máximos datos de esta agua, que serán posteriormente revisados por la OMI, con el apoyo del GESAMP (Group of experts on the scientific aspect of marine environmental pollution).

El objetivo principal de las pautas del 2009 es la definición de los requerimientos para las pruebas, inspección, certificación y verificación de los sistemas que están permitidos bajo la regla 4 del Anexo VI del MARPOL. Para así asegurar que existe esta equivalencia en emisiones que se comenta en las reglas 14.1 y 14.2, aplicables a la maquinaria que consume fuel oil a bordo, exceptuando los incineradores.

Para poder contar con una instalación aprobada para el uso, se tiene dos opciones a nivel esquemático: **Esquema A** y **Esquema B**.

### *Esquema A*

En este caso el sistema de limpieza de gases, para ser aprobado, debe demostrar que es capaz de mantener las emisiones en el rango definido por el fabricante (las emisiones certificadas), usando el combustible con máxima cantidad de azufre determinada por el mismo fabricante.

En las pautas definidas, existen una serie de herramientas para que el proceso de testeo se reduzca, en el caso de equipos fabricados en serie o bien con gran similitud entre equipos, una vez se da la conformidad para ser aprobado. Alternativamente, cabe destacar que, si el fabricante asume el testeo de emisiones durante alta, media y baja capacidad del scrubber, la instalación será aprobada por certificado de cumplimiento de emisiones SO<sub>x</sub> (SECC), con número de serie específico.

El scrubber debe ir acompañado por un manual de mantenimiento e inspección (ETM-A), que deberá ser aprobado por la administración competente y el EGCS debe ser inspeccionado después de su instalación para garantizar que se siguen los parámetros definidos en el ETM-A y dispone de los relevantes SECC. Una vez se superan todos estos pasos, se permitiría al buque de solicitar una renovación y actualización de su certificado IAPP (international air pollution prevention), para reflejar la disposición de este sistema de limpieza de gases a bordo.

El buque debe mantener un EGC record book, donde se debe registrar todos los mantenimientos e inspecciones que se hacen a la instalación y este libro será chequeado por el fabricante cuando le corresponda hacer alguna inspección. Es importante recordar que todo documento que se crea nuevo de los numerados anteriormente deben ser aprobados por la administración de la bandera, o bien, otra que haya sido autorizada por la misma.

### *Esquema B*

Los sistemas de limpieza de gas que sigan el esquema B no necesitan de una precertificación que demuestre que se cumplen con las emisiones definidas en las reglas 14.1 Y 14.4 del Anexo VI, durante ningún tipo de carga, pero lo que debe de cumplir es estar siempre en cumplimiento de ratio  $SO_2/CO_2$  despues del scrubber, según la tabla siguiente.

La medida de esta ratio debe ser de manera continua con un sistema de monitorización de las emisiones aprobado por la administración y que registra los datos con una frecuencia no inferior a 0.0035 Hz.

Fuel Oil Sulfur Content (%m/m)	Ratio Emission SO <sub>2</sub> (ppm)/CO <sub>2</sub> (%v/v)
4.5	195.0
3.5	151.7
1.5	65.0
1.00	43.3
0.50	21.7
0.10	4.3

*Tabla 6 Equivalencia entre el contenido de azufre y las emisiones del EGCS. Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems.*

De la misma manera que en el caso del esquema tipo A, hemos definido el concepto de ETM-A, en este caso hablamos del ETM-B, también sujeto a la aprobación de la administración.

Una vez el esquema está montado, se debe llevar a cabo la reglamentaria inspección del Anexo VI (anual o intermedia) y así estar capacitados para la solicitud del correspondiente certificado IAPP.

El continuo cumplimiento de la reglamentación debe ser confirmada continuamente con una monitorización de las emisiones diaria y con el correspondiente registro en el EGC record book, igual que en el caso del esquema A.

## Documentación requerida para el sistema EGC

Todo buque que pretenda usar el sistema de limpieza de gases, debe contar con la siguiente documentación:

### 1. SECP: SO<sub>x</sub> Emissions Compliance Plan

Se necesita la aprobación de la administración para la validez de este plan de gestión de emisiones.

## 2. OMM: Onboard monitoring manual

Se debe contar con un OMM a bordo de todo buque que disponga de sistema de limpieza de gases y debe registrar los siguientes parámetros:

- a. Monitorización de las emisiones y agua de limpieza, incluyendo mantenimientos y calibraciones hechas.
- b. Posiciones donde las emisiones y los parámetros del agua de lavado deben considerarse conjuntamente (debido a mantenimiento o algún otro motivo justificado)
- c. Datos en los equipos de análisis usados en las emisiones y agua de lavado (se incluye requerimientos de funcionamiento, servicios y mantenimientos)
- d. Procedimientos para el test de posición cero en los equipos de análisis.
- e. Otros datos relevantes necesarios para operar correctamente los equipos
- f. Información sobre cómo deben ser inspeccionados los equipos de monitorización

### Monitorización de emisiones

Para los scrubbers que operan con combustibles destilados y residuales, se requiere una equivalencia de emisiones que viene definida en las pautas del 2009, y hemos visto anteriormente como “tabla 3”. Lo que nos define esta tabla es según un modelo concreto de motor diésel, que emite emisiones de  $CO_2$ , se procede al calculo del valor correspondiente de concentración de azufre.

Por ejemplo, menos de 4.3 para un buque que opera en una zona ECA a partir del 1 de enero de 2015, donde el porcentaje máximo de azufre aceptado en el combustible es del 0.1%, para que el sistema de limpieza de gases sea considerado de efectividad equivalente.

De esta ratio de  $SO_2/CO_2$  se deriva una correspondencia más simple y aplicable a los combustibles marinos.



## Criterios para la descarga del agua de lavado y monitorización

En las pautas definidas por la OMI en el 2009 se especifica la calidad y los parámetros que deben ser monitorizados.

Document	Scheme A – Parameter Check	Scheme B – Continuous Monitoring
SOx Emissions Compliance Plan (SECP)	X	X
SOx Emissions Compliance Certificate (SECC)	X	
EGC Technical Manual, Scheme A (ETM-A)	X	
EGC Technical Manual, Scheme B (ETM-B)		X
Onboard Monitoring Manual (OMM)	X	X
EGC Record Book or Electronic Logging System	X	X

Tabla 7 Lista de documentación requerida. Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems.

### Criterios para el pH

El pH del agua de lavado descargada al mar no debe ser inferior a 6.5, con la única excepción cuando el buque está en maniobra o tránsito, donde la diferencia pH entre la toma de mar y la descarga puede llegar hasta 2 unidades (medición en la descarga al mar).

Maneras de conseguir el cumplimiento de este requerimiento:

1. Dilución con el agua de mar: Por ejemplo, la descarga de agua de mar de los intercambiadores de baja temperatura
2. Para los sistemas de limpieza de gases con químicos o cualquier otra opción, se debe valorar por separado, teniendo en cuenta las pautas de la OMI para la gestión de aguas de lastre que hacen uso de sustancias activas (G9) bajo la MEPC.169(57).
3. Durante la puesta en marcha del sistema de limpieza de gases, el pH puede ser medido en puerto a una distancia de 4 metros de la descarga al mar. Este valor es el que se registrará

en los manuales ETM-A o ETM-B según corresponda. Por lo tanto, se puede tener como objetivo, conseguir el valor de 6.5 pH en este punto.

El pH debe ser continuamente monitorizado con un electrodo de pH y un medidor, con una resolución de 0.1 pH y compensación de temperatura, teniendo en cuenta que ambos deben cumplir con los estándares definidos por las pautas del 2009.

### *Hydrocarburo aromático policíclico (PAH)*

El agua de lavado también debe ser monitorizada para la localización de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), teniendo en cuenta que la máxima concentración de PAH no puede ser mayor a 50 micro g/L PAH<sub>phe</sub> (equivalencia en fenantreno) por encima de la concentración de PAH en la aspiración de agua de mar.

La concentración de PAH en la descarga debe ser medida después de cualquier elemento de tratamiento de aguas, pero antes del equipo de dilución del agua de lavado, para un sistema de limpieza de gases con un flujo de agua de lavado de 45 t/MWh, que es ajustado según la tabla 5.

Es importante destacar que las pautas del 2009 permiten una desviación en los valores durante un máximo de 15 minutos de hasta un 100% del valor límite, durante cualquier periodo de 12 h de operación del EGCS.

Flow Rate (t/MWh)	Discharge Concentration Limit ( $\mu\text{g/L PAH}_{\text{phe}}$ equivalents)	Measurement Technology
0-1	2,250	Ultraviolet Light
2.5	900	Ultraviolet Light
5	450	Fluorescence
11.25	200	Fluorescence
22.5	100	Fluorescence
45	50	Fluorescence
90	25	Fluorescence

Tabla 8 Límites a la concentración de PAH a la descarga. Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems.

El PAH de la descarga al mar debe ser continuamente monitorizado y el equipo de medida debe ser capaz de medir el doble del límite estipulado por la tabla 5. Ya sea usando haciendo uso de sistemas de medida ultravioleta o fluorescente permitidos. De la misma manera que el equipo no puede desviarse más del 5% del rango aplicado.

### *Turbidez / partículas suspendidas*

La turbidez de la unidad de agua de lavado no debería exceder los 25 FNUs (formazin nephelometric units) o bien 25 NTUs (nephelometric turbidity units), respecto a la turbidez del agua de entrada. Las condiciones del testeo serían después del tratamiento que se disponga, pero anterior a la dilución del agua de lavado y durante 15 minutos. Aunque es importante tener en cuenta que todo sistema de tratamiento debería ser diseñado para minimizar las partículas suspendidas como los metales pesados.

Por lo que hace a los requerimientos de las pautas del 2009, se permite una desviación de hasta un 20% durante 15 minutos cada 12 horas, respecto a los valores límite definidos anteriormente.

### *Nitratos*

El sistema de tratamiento del agua de lavado debe prevenir la descarga de nitratos por encima de un nivel equivalente a la reducción del 12 % de NO<sub>x</sub> de los gases de escape, o bien, 60 mg/l para un flujo de 45t/MWh. Y, por lo que hace a la demostración del cumplimiento de este parámetro, se debe entrar una muestra para el análisis de nitratos cada 3 meses y, si el resultado es positivo, se obtiene un certificado de cumplimiento que se debe adjuntar al EGC record book.

En este aspecto, las pautas del 2009 exigen que se haga testeo a menudo y, siempre que el valor de nitratos esté por encima del 80% del límite superior, dejar constancia en el ETM-A o ETM-B, correspondientemente.

## **Agencia de protección ambiental de los estados unidos**

En el caso de los estados unidos, existe el VGP o “vessel general permit”, y, este documento se define los criterios para esta agua de lavado del EGCS.

La versión mas actual es la VGP2, entrado en vigor en 2013, que ya responde a las pautas definidas por la OMI en el 2009, con respecto a la monitorización, testeo, pruebas, etc.

### *Monitorización de parámetros*

Las pautas del 2009 requieren que una parte del sistema de limpieza de gases sean los equipos de monitorización. Siendo los siguientes datos, considerados como básicos, de monitorización y registro automático obligatorio.

1. Hora en UTC (universal coordinated time)
2. Posición según el GNSS (global navigational satellite system)
3. Presión y flujo del agua de limpieza, en la aspiración.
4. Presión de los gases de escape anterior al EGCS y diferencial de presión que ocurre en el mismo.
5. Carga del motor / caldera
6. Temperaturas antes y después del EGCS
7. Contenido de SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en los gases de escape
8. pH, PAH, y turbidez del agua de lavado

Características del equipo de medida:

- Debe ser robusto
- De tipo read-only
- Capacidad de lectura con una frecuencia de 0.0035 Hz
- Almacena la información durante una duración mínima de 18 meses.
- Capacidad de descargar la información por la administración del PSC (port state control), en caso necesario

### *Residuos del agua de lavado*

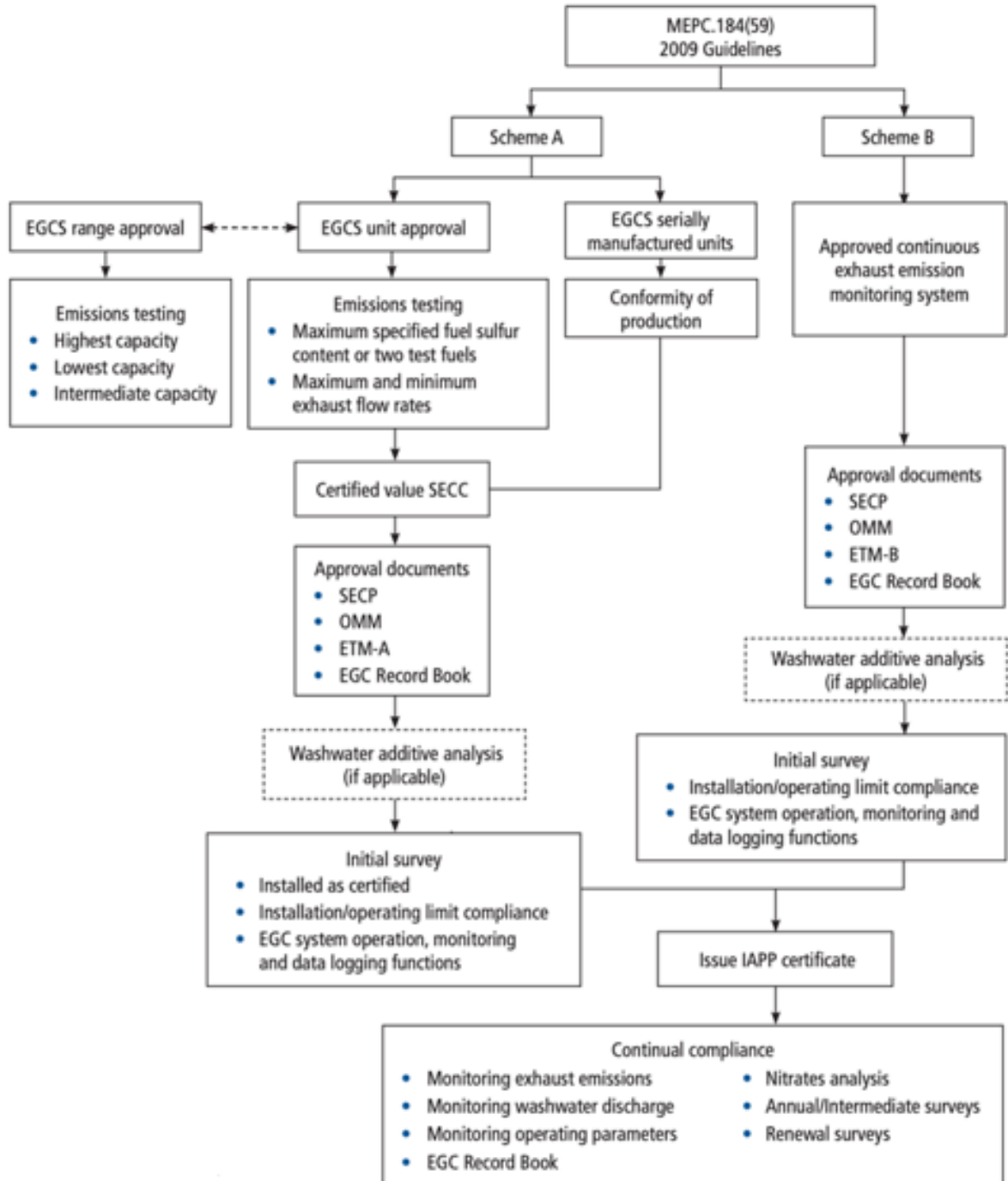
Los residuos del agua de lavado no pueden ser considerados ni sentina ni lodos, de manera que deben mantenerse a bordo en tanques específicos para este tipo de residuo y deben descargarse a tierra, donde las autoridades deben facilitar un sistema para coleccionar el mismo, según la regla 17 del anexo VI del MARPOL.



## Aprobación del sistema de limpieza de gases de escape

Para una aprobación completa de la instalación de limpieza, se deben considerar 2 partes:

1. Proceso de aprobación del MARPOL, cubriendo los aspectos estrictamente medioambientales
2. Proceso de aprobación por la Sociedad de clasificación, que cubriría los aspectos medioambientales, pero también tendría en cuenta las recomendaciones y los estándares voluntarios definidos por el fabricante de sistema.



Il·lustració 15 Proceso jerárquico de aprobación de la instalación. Fuente: ABS advisory on exhaust gas scrubber systems.

## Comparativa económica del uso de combustibles que emiten menos NOx Y el uso permanente de combustibles con un contenido de azufre inferior al 1%

### El precio de los combustibles

Primeramente, sería importante poder llevar a cabo un estudio del desarrollo de los precios de los diferentes combustibles en este año, ya que, al no ser un año afectado por las peculiaridades de la pandemia y, además, coincidiendo con un año muy importante en el plan medioambiental europeo. En el que se definía el 2020 como punto de inflexión, ya que se aumentarían las zonas ECA y se añadían limitaciones adicionales al uso de combustibles.

En la *ilustración 14*, podemos observar un ligero movimiento relativamente similar para el diésel y el fuel oil marino. Cosa que no sucede en el caso del gas natural licuado, que primeramente sufre una ligera caída y, a partir de aquí, el crecimiento es mucho más pronunciado que en el caso de los demás combustibles estudiados.

Los cálculos se realizarán teniendo en cuenta el precio de los combustibles a fecha de 15 de octubre 2020. (fuente: shipandbunker.com)



Feb 1, '21 - Jul 30, '21	High	Low	Average	Spread
<b>Rotterdam - LNG</b>	\$778.00	\$459.50	\$569.00	\$318.50
Global 20 Ports Average - IFO380	\$448.00	\$354.00	\$408.50	\$94.00
Global 20 Ports Average - MGO	\$650.00	\$506.00	\$590.00	\$144.00
Global 20 Ports Average - VLSFO	\$565.00	\$454.50	\$522.00	\$110.50

Ilustración 16 Evolución del precio de los combustibles (Fuente: Shipbunker.com)

Para nuestro análisis, se tomarán precios actuales de los diferentes combustibles. Es decir, los siguientes:

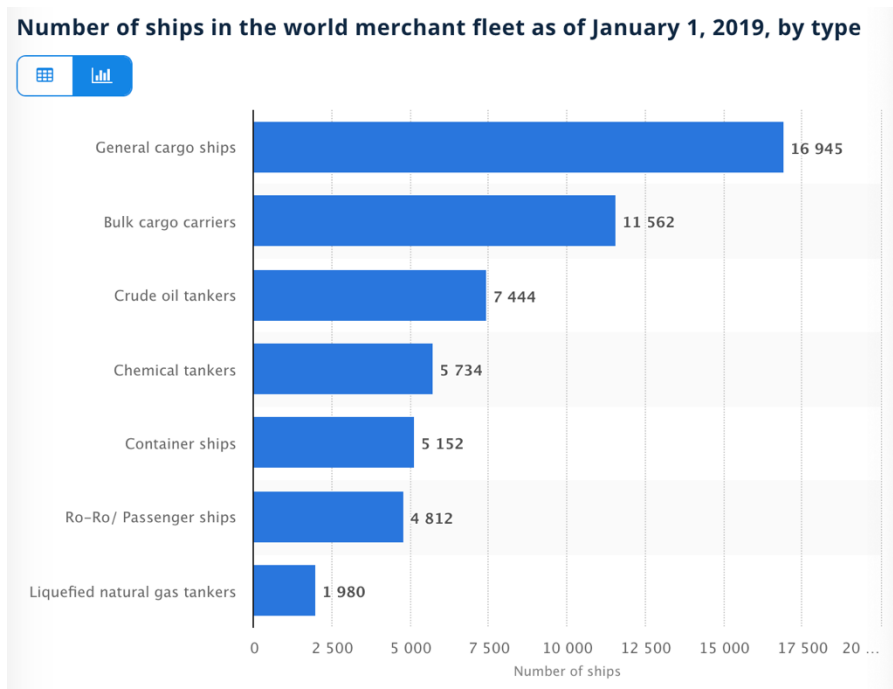
<i>Combustible</i>	<i>Precio (\$/mt)</i>
<i>IFO380</i>	408.5
<i>VLSFO</i>	522
<i>MGO</i>	693
<i>LNG</i>	569

Tabla 9 Precios de los combustibles en fecha 03-09-2021. Fuente: [www.shipandbunker.com](http://www.shipandbunker.com)

## Flota mundial

Según un estudio realizado en enero del 2019, se contabilizó la totalidad de barcos existentes en 53,732 barcos. De los cuales el 62% son buques de carga general, graneleros y portacontenedores. Por lo que nuestro estudio estará enfocado en este tipo de buques ya que en todos los casos serán instalaciones parecidas, aunque con distribuciones adaptadas a cada caso.





Il·lustració 17 Número de barcos en el mundo en enero 2019 (Fuente: [www.statista.com](http://www.statista.com))

Como conclusión, llegamos a que la mayor cantidad de barcos pertenecientes al flete mundial, son del tipo mercante de carga. De manera que, vamos a centrar el estudio en un buque de este tipo y de los motores que tenga un barco de este tipo.

## Cálculo teórico y comparación de los combustibles:

Para el ejemplo, supondremos cierto buque con una potencia de alrededor de 55,000 kW. (Fuente: datos técnicos de la gama de productos de MAN B&W)

En este caso que se estudiará el motor **MAN B&W S90ME-C10.5 (la versión de 9 cilindros en línea)**. El cual tiene las siguientes especificaciones técnicas:

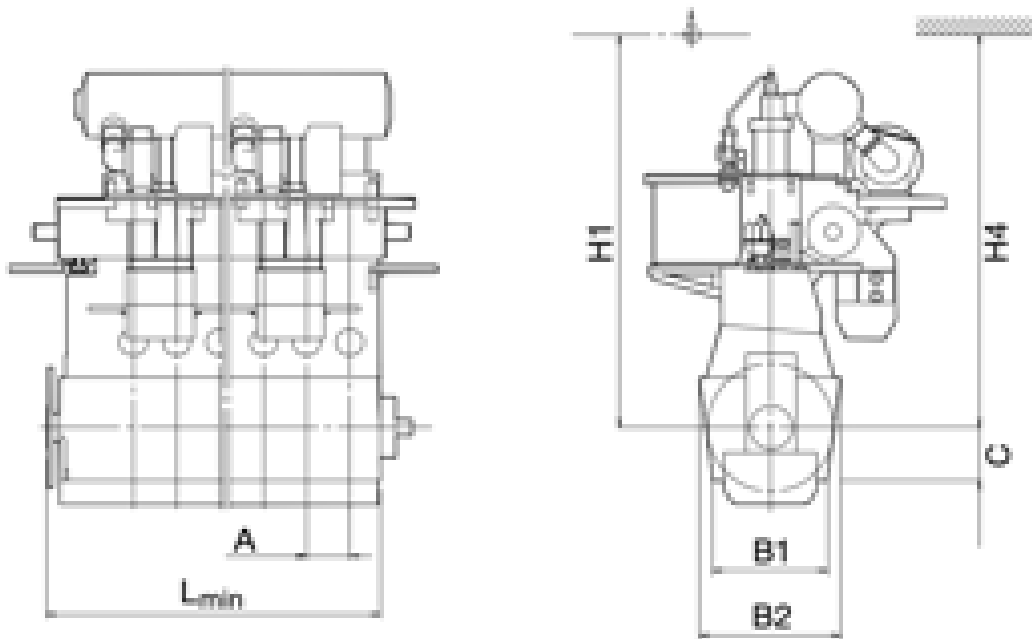
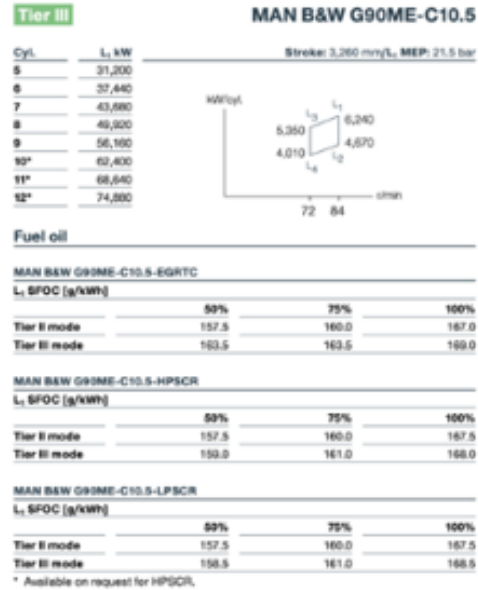
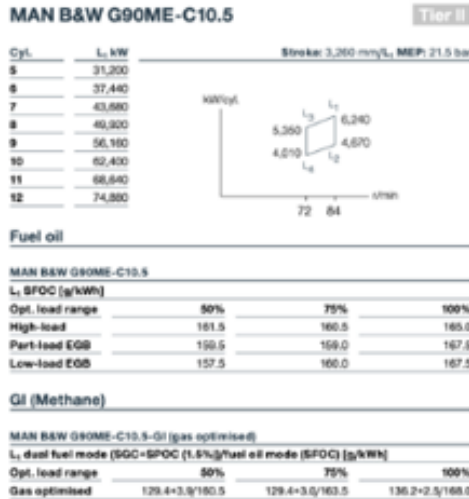
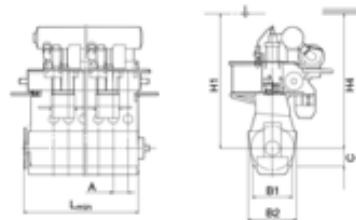
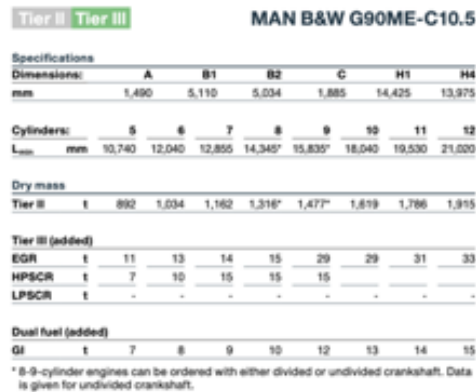
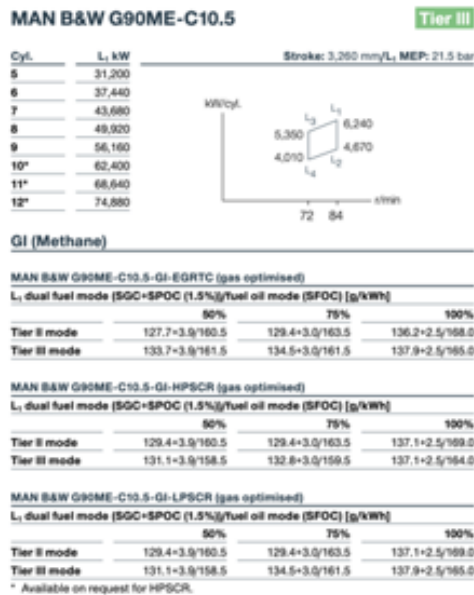


Ilustración 18 Dimensiones del motor MAN B&W S90ME-C10.5.  
Fuente: [www.man-es.com/marine](http://www.man-es.com/marine)



28 **MAN Energy Solutions**  
MAN B&W two-stroke propulsion engines

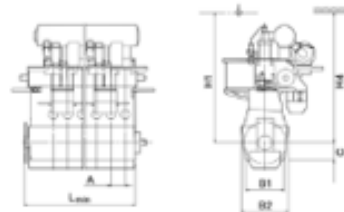
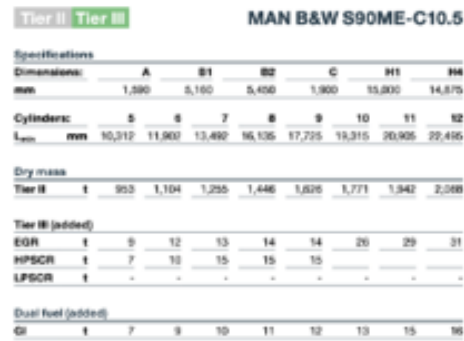
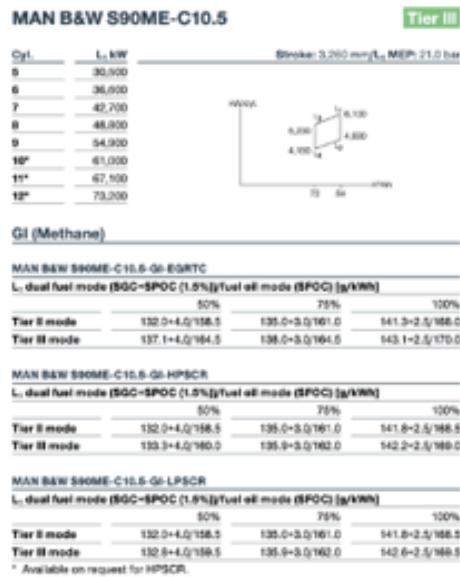
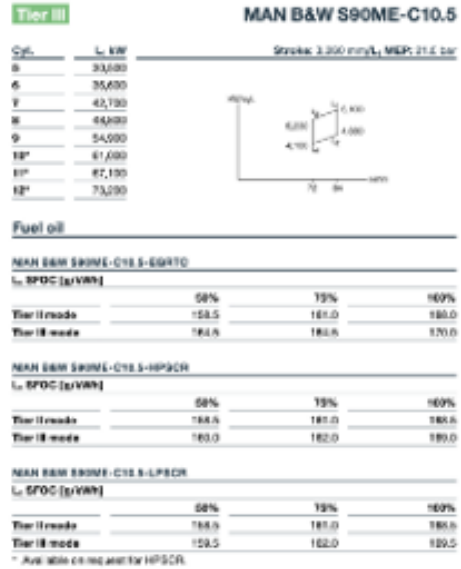
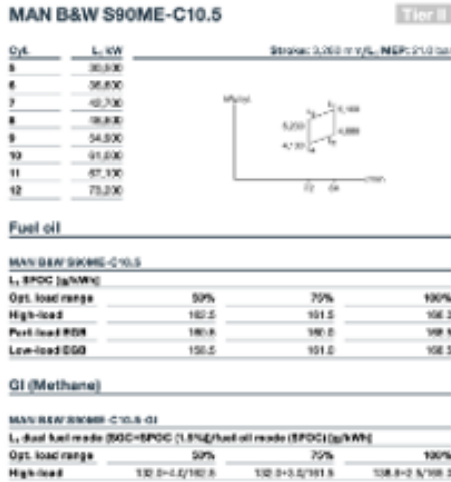
29



30 **MAN Energy Solutions**  
MAN B&W two-stroke propulsion engines

31

Ilustración 19 Especificaciones del motor elegido definidas por el fabricante (Parte I). Fuente: www.man-es.com



En resumen, y, como el objetivo de este proyecto es, principalmente el consumo, ya que de este dependen todos los demás parámetros. Destacamos los siguientes datos:

<i>TIER II</i>		<b>LOAD</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>
FUEL OIL		High load EGB [g/kWh]	161,5	160,5	165
		Medium load EGB	159,5	159	167,5
		Low load EGB	157,5	160	167,5
LNG		SGC (specific gas cons.)	129,4	129,4	136,2
		SPOC (specific pilot oil cons.)	3,9	3	2,5

Tabla 10 Consumos específicos del motor elegido. Fuente: [www.man-es.com](http://www.man-es.com)

Una vez tenemos los datos del consumo del motor, proponemos una de las travesías típicas de los buques de carga. Que será entre el continente asiático y Europa:

<b>VIAJE:</b>	ASIA-EUROPA	
<b>DURACION:</b>	10 DÍAS	240 HORAS
<b>CARGA:</b>	75-80%	

Tabla 11 Condiciones del trayecto para el cálculo ejemplo. Fuente: propia

**Consumo (kg/h)**

	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>
<i>Fuel oil</i>	4992,77	7442,78	10201,95
<i>Dual fuel mode</i>	4120,96	4093,14	4287,91
<i>SGC</i>	4000,40	4000,40	4210,62
<i>SPOC</i>	120,56	92,74	77,28

Tabla 12 Resultado de consumo resultante en kg/h, para el trayecto elegido. Fuente: propia

<i>consumo total trayecto (kg)</i>	<b>fuel</b>	<b>dual fuel</b>	<b>SGC</b>	<b>SPOC</b>
50%	1198265,4	989032,68	960096,24	28936,44
75%	1786268,7	982355,04	960096,24	22258,8
100%	2448468	1029098,52	1010549,52	18549

Tabla 13 Consumo total calculado. Fuente: propia

### Cálculos:

Antes de empezar con el planteamiento de los cálculos debemos entender cómo funciona el motor en cada caso, ya que uno de los retos que representa el consumo de gas natural licuado es la ignición. Para poder eliminar este riesgo, lo que se hace es instalar un inyector adicional al que llamamos inyector piloto. Este, inyecta diésel en todos los casos, en cantidades muy reducidas, ya que su único objetivo es generar la ignición y, a partir de allí, el gas se quemará sin ocasionar ningún problema adicional. Por lo tanto:

- **Motor de Fuel oil** → 1 único inyector principal, que proporciona Fuel oil.
- **Motor de diésel** → 1 único inyector principal, que proporciona diésel.
- **Motor de GNL** → 2 inyectores. Un inyector principal llevando el GNL y otro piloto que lleva diésel.

A partir de aquí, empezamos el cálculo para los diferentes escenarios:

- Recordemos los precios que tomamos como referencia.

<b>Combustible</b>	<b>Precio (\$/mt)</b>
<b>IFO380</b>	408.5
<b>VLSFO</b>	522
<b>MGO</b>	693
<b>LNG</b>	569

Tabla 14 Precios de los combustibles en fecha 03-09-2021. Fuente: [www.shipandbunker.com](http://www.shipandbunker.com)

Anteriormente, hemos definido los consumos del motor en g/kWh. Entonces, basándonos en los mismos, y, multiplicando por la potencia del motor, podemos obtener el consumo de mismo en Kg/h. Que viene representado en la siguiente tabla:

<b>Consumo (kg/h)</b>			
	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>
<b>Fuel oil</b>	4992.7725	7442.78625	10201.95
<b>Dual fuel mode</b>	4120.9695	4093.146	4287.9105
<b>SGC</b>	4000.401	4000.401	4210.623
<b>SPOC</b>	120.5685	92.745	77.2875

Tabla 12 Resultado de consumo resultante en kg/h, para el trayecto elegido. Fuente: propia

Multiplicando el consumo por la cantidad de horas del trayecto, obtenemos:

<b>consumo total trayecto (kg)</b>	<b>fuel</b>	<b>dual fuel</b>	<b>SGC</b>	<b>SPOC</b>
<b>50%</b>	1198265.4	989032.68	960096.24	28936.44
<b>75%</b>	1786268.7	982355.04	960096.24	22258.8
<b>100%</b>	2448468	1029098.52	1010549.52	18549

Tabla 13 Consumo total calculado. Fuente: propia

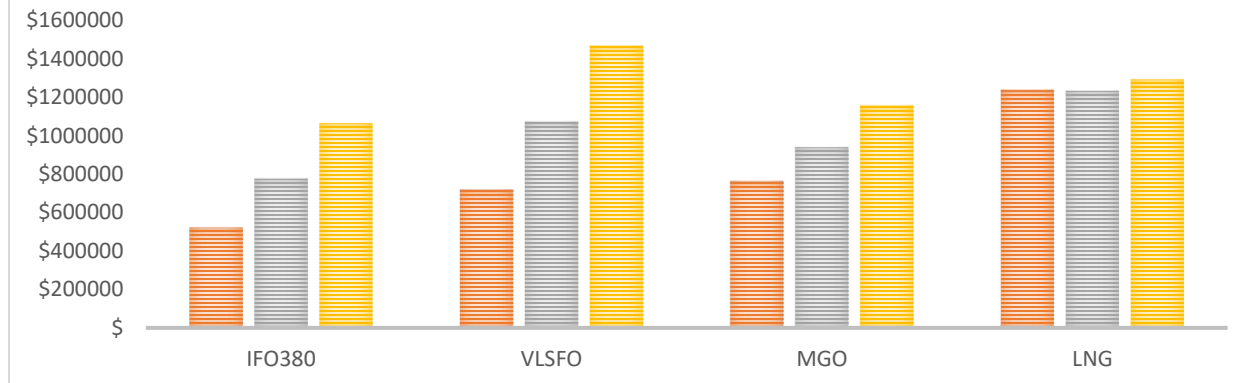
Del motor elegido, cuando estamos consumiendo LNG, podemos ver cómo, el consumo, hasta el 50% aumenta de manera considerablemente rápida. Dándose la situación de que, con un 75% de carga, el consumo del motor es inferior a cuando el mismo tiene un 50% de carga.

Finalmente, como hemos podido calcular el consumo total de combustible en el trayecto y, al principio de este apartado hemos determinado el precio de cada combustible, podemos estimar el coste que nos representa el combustible:

<b>coste económico trayecto [\$]</b>	<b>IFO380</b>	<b>VLSFO</b>	<b>MGO</b>	<b>LNG</b>
<b>50%</b>	\$520.735.55	\$718.959.24	\$765.041.54	\$1.237.719.66
<b>75%</b>	<b>\$776.266.77</b>	<b>\$1.071.761.22</b>	<b>\$938.704.30</b>	<b>\$1.232.243.21</b>
<b>100%</b>	\$1.064.041.68	\$1.469.080.80	\$1.156.531.69	\$1.292.996.10

## COSTE ECONÓMICO TRAYECTO 10 DÍAS [\$]

Tabla 14 Comparación del coste de los diferentes combustibles para el mismo trayecto. Fuente: propia



### Conclusiones:

Del análisis hecho podemos llegar a la conclusión de que el consumo del IFO380 es mucho más viable que el consumo de los demás combustibles. Pero, debemos recordar que hay un gasto adicional que no se ha tenido en cuenta para este cálculo y es el coste tanto de la instalación, como del mantenimiento del Scrubber.

Debido a las diferentes circunstancias de la actualidad y a la oferta mundial de los diferentes combustibles estudiados, hemos podido llegar a conclusiones relativamente variables:

1. El punto a favor del LNG es que el consumo no tiene una variabilidad muy importante a partir del 50% de carga en el motor, lo que lo hace muy interesante y viable a cargas altas.
2. El HFO en cambio tiene unas diferencias importantes dependiendo de la carga a la que esté sometido el motor. Si a este aspecto, ya negativo de por sí, le añadimos el precio del combustible actual, se convierte en una de las opciones menos atractivas.
3. A nivel de las cantidades de consumo en el caso del MGO y LNG, observamos que es un consumo total muy similar. La diferencia está en que el caso del LNG tenemos alrededor del 98% LNG y solo el 2% de MGO para la ignición.



Como hemos podido concluir, el coste del trayecto tendrá un coste relativamente variable dependiendo del combustible usado. Así que, desde el punto de vista exclusivamente del consumo, podemos empezar a situar cada combustible en un puesto concreto.

## Estudio de la contaminación portuaria y costera producida por los Scrubbers de sistema abierto.

Enero de 2015 representó el comienzo del nuevo camino hacia el consumo de combustibles más limpios, o bien, el comienzo de la búsqueda de planes alternativos para poder cumplir con las nuevas regulaciones. En este año, se limitó el contenido de azufre emitido a la atmósfera en las zonas ECA. Lo que obligó a la adaptación a todos los buques que transitaban por dichas zonas, pero a la vez era un primer aviso a los demás. Ya que posteriormente se limitaría el azufre en el resto del mundo.

Muchas compañías optaron por el consumo de combustibles con una cantidad inferior de azufre, que les permitiese seguir operando en dichas zonas y cumplir con las reglamentaciones vigentes. Pero, hubo otras que optaron por la instalación de los scrubbers como método de limpieza de gases, ya que, esto les permitiría continuar empleando el mismo combustible con un 3.5 % de azufre, pero que el scrubber reduciría hasta cantidades que cumplieran con el reglamento vigente.

Los scrubbers fueron una idea válida en los inicios porque realmente reducía las cantidades de SOx emitidas a la atmósfera y, debido a como la normativa solo exige eso y a que se daba bastante libertad para instalar sistemas de limpieza, entonces se pudo aprobar el sistema.

Recordemos que la normativa exigía claramente la reducción de las emisiones, pero dejaba muy abierto el abanico de posibilidades para hacer este proyecto realidad. Es decir, se habla claramente de usar combustibles menos contaminantes, pero, por lo que hace a la limpieza, se decía que debe ser un sistema de limpieza y con monitorización de unos parámetros definidos. Si esto se cumplía, y se demostraba que los parámetros estaban dentro de los rangos predefinidos, el sistema era apto.

Como hemos dicho, el 2015 fue un primer aviso al mundo sobre los cambios que vendrían en un futuro. Y, efectivamente, más tarde, se definió que, para el 2020, se limitaría el contenido de azufre al 0.5% en todo el mundo.

Comienzo de las limitaciones	SOx límite en zonas ECA	Sox límite en el resto del mundo
	1.50%	4.50%
<b>mar-10</b>	1%	
<b>2012</b>		3.50%
<b>2015</b>	0.10%	
<b>2018</b>		
<b>2020</b>		0.50%
<b>2025</b>		Alternativo para 0.5%

Tabla 15 Limitaciones Sox y momento de aplicación. Fuente: OMI

Los scrubbers, como ya hemos comentado en los apartados anteriores, cumple con los requisitos determinados por la normativa actual, pero, el problema reside en los scrubbers húmedos de ciclo abierto ya que generan unos residuos líquidos que acaban descargándose al mar.

El reglamento que regula esta agua residual viene definido en la resolución de la IMO MEPC.184 (59) del 2009. Ya que, las descargas de estos residuos provocan principalmente:

- Disminución del pH del agua
- Aumento de la temperatura
- Aumento de la turbidez
- Contaminación del agua con materiales persistentes.

Hasta el momento se han realizado diversos estudios del agua residual que es descargada al mar y las conclusiones han sido favorables. Esto es debido a que los análisis se han hecho de cortos periodos de tiempo y de cada descarga en concreto. Es decir, que no se ha tenido el efecto acumulativo de las descargas, ya que en zonas del mundo como los mares o las zonas costeras el efecto puede ser más dañino que en otras zonas más cercanas al océano.

Según el conocimiento actual que se dispone de estas descargas, probablemente, la limitación de las descargas o bien la prohibición de la operación de los scrubbers en ciclo abierto, sería una medida que ayudaría a reducir el impacto generado actualmente por estos equipos.

Composición física y química del mar, salobre y agua potable:

	Agua de mar/ North sea	Mar Báltico	Estuarios	Agua potable
T (°C)	5-15	0-20	1-20	0-20
Salinidad (PSU)	32-37	3-9	0.5-17	0-0.5
Alcalinidad (µmol/kg)	2300-2600	700-2000	0.1-5000	0.1-5000

Tabla 16 Características de las diferentes aguas que intervienen en el proceso de limpieza. Fuente: <https://theconstructor.org/environmental-engg>

Los Scrubbers normalmente pueden operar con baja alcalinidad también, pero el rendimiento de la limpieza es menor, por lo que debe compensarse. Y, la cantidad de agua residual disminuye en función del bajo pH o alta temperatura del agua de mar.

### Reglamento para los componentes del agua residual

Componente	Límite	Criterio
Valor del pH	Min. 6.5, máx. 2 pH unidades en la aspiración	Medido después de la unidad de dilución
PAH	Máx. 50 µg/l PAH <sub>phe</sub> (equivalentes a los fenantrenos) a la aspiración (con flujo de 45 t/MWh)	Medida en la aspiración y en la descarga del EGCS, antes de la unidad de dilución
Turbidez/ partículas disueltas	Máx. 25 FNU (unidad de partículas disueltas) o 25 NTU (unidad de turbidez)	Medido en la descarga del scrubber, antes de la unidad de dilución
Nitratos	Máx. 60 mg/l para flujo de 45t/MWh	Deben corresponder a una reducción mínima del 12% de los NO <sub>x</sub>

Tabla 17 Límites y criterios a seguir para los parámetros del agua. Fuente: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

Además de la resolución MEPC 184 (59) 2009, 10.4, las siguientes limitaciones también aplican:

- Monitorización del contenido de aceite indirectamente, a través del contenido de PAH
- Residuos de las unidades de limpieza de gases deben disponerse en las instalaciones de colección portuarias pertinentes.
- Almacenamiento y descarga de los residuos generados por el equipo de limpieza debe registrarse de manera apropiada, indicando fecha, hora y lugar.

### Casos reales estudiados

Existen varias publicaciones sobre el agua residual producida por los sistemas de limpieza de gases a bordo de buques. Por ejemplo, Marintek estudió en el 2006 el caso del MS Fjordshell, Hufnagl en el 2005, estudió el MS pride of Kent y tanto Hansen como Kjøholt estudiaron el caso del MS Ficaria Seaways en el 2012.

Estas publicaciones nos permitirán analizar parte por parte los contaminantes restantes después de la limpieza y las conclusiones a las que se ha podido llegar:

<b>Autor</b>	<b>Buque</b>	<b>Tipo de Scrubber</b>
<b>Buhaug (2006)</b>	MS Fjordshell	Ciclo abierto
<b>Hufnagl (2005)</b>	MS Priide of Kent	Ciclo abierto
<b>Hansen y Kjøholt (2012)</b>	MS Ficaria Seaways	Híbrido

Tabla 18 Investigaciones hechas. Fuente: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

Como observaciones debemos destacar que en el caso de Buhaug el combustible usado era HFO con 2.7% de azufre y que en el caso del MS Ficaria Seaways, aunque los expertos estuvieron midiendo los mismos parámetros, en algunos casos veremos como difieren de manera considerable.

Resultados:

		Fjordshell			Ficaria (Kjøholt)			Ficaria (Hansen)			Kjøholt			
		SW *		Sea water	SW (2.2 %)		FW **	SW	FW	Fuel HFO	Sludge	HFO	HFO	MGO
		high load	low load		high load	low load	high load	high load	high load	2.20%		2.2 % S	1.0 %	0.1 %
		90 % MCR	30 % MCR		80-95% MCR	40-45% MCR	T=120 centrif.		85% CR	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Fuel use	kg/h				3510	1850	3520							
Water use	t/MWh	50	150		50	50		50						
Nitrogen	µg/l			0.12	0.56	0.34	120	31-130						
Sulphur	µg/l			865	900	900	9000							
Vanadium	µg/l	35	23	1.8	180	81	14000	162.9	3	155	6600	150	36	<1
Nickel	µg/l	32.8	10.4	8.9	43	20	3100	41.1	BDL	47	4000	42	22	3
Zinc	µg/l	6	15	< 2.0 - 8.0	450	150	420	200	BDL	BDL	370	<20	<20	<20
Chromium	µg/l	<1	< 1	BDL	BDL	BDL	BDL	4.8	BDL	3	250			
Lead	µg/l	5	0.6	< 0.02	21	3.6	3.8	13.1	BDL	BDL	43	<1	<1	<1
Copper	µg/l	41.6	15.3	5	260	150	860	115.6	BDL	BDL	780	<3	<3	<3
Mercury (Hg)	µg/l	< 0.1	< 0.1	0.12	0.086	0.092	< 0.05	BDL	BDL	BDL	0.03	<0.2	<0.2	<0.2
Arsenic	µg/l	< 0.1	< 0.1	1.5	< 1.0	1.8	9.8	0.2	BDL	BDL	6	<0.5	<0.5	<0.5
Cadmium	µg/l	0.05	0.08	< 0.20	< 0.20	< 0.20	0.094	0	BDL	3	< 0.05	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Hydrocarbon (THC)	µg/l	50	-8	31 - 53***	110	140								
PAH (USEPA)	µg/l	<0.1	<0.1		0.96	1.1	3.8	5 - 7****	5.2 - 13.1		230			
Naphtalene	µg/l				0.48	0.51	0.32							
Filtered sample	µg/l				0.62	0.65								
PCDD	pg/l	-46.1												
PCDF	pg/l	240.7												
Water throughput	t/MWh	50	150		50	50		50						

Tabla 19 Resultados de los estudios realizados en los buques: Fjordshell, Ficaria y Kjøholt.

Fuente: www.umweltbundesamt.de

Análisis de todos los componentes de la descarga:

## Metales pesados

Las conclusiones que podemos sacar de los resultados expuestos anteriormente son sobretodo 3.

1. El contenido de Vanadio y Níquel en el agua residual es proporcional a la cantidad de azufre en el combustible
2. Los contenedores y los materiales de los conductos pueden resultar en un contenido adicional de metales en el agua residual
3. Todos los demás metales parecen estar asociados con partículas de los gases de escape, por lo tanto, fáciles de eliminar.

## Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs)

1. Es importante distinguir entre los PAHs de cadena larga y los de cadena corta.
  - a. Los PAH de cadena larga se adhieren a las partículas y son fáciles de filtrar de las partículas de aguas residuales
  - b. Los PAH de cadena corta son agua soluble y permanecen en el efluente del depurador
2. Hay diferencias en la eficiencia en los procesos de filtrado del agua residual, pero se necesita más investigación para llegar a conclusiones fundamentadas.

## Nitratos/ Sulfatos

1. Hansen y Buhaug detectaron ligero incremento de nitratos en el agua residual
2. Los valores medidos son muy inferiores a los limitantes estipulados por las pautas del 2009, que establecían el límite en 60 mg/l
3. La ratio de sulfatos medidos por Hufnagl están por debajo de la ratio de error del método de medición.

## Conclusiones

Dependiendo del estudio realizado, podemos observar una serie de resultados con diferencias obvias. En parte, las diferencias han sido motivadas por el tipo de estudio realizado y por los aspectos que se han tenido en cuenta en cada caso, lo que no nos permite tener un claro punto de vista sobre el análisis hecho. Por otro lado, el mantenimiento constante de bajos valores de PAH se ha observado que es una hazaña de gran complejidad. Además, es muy importante tener en cuenta la tecnología de filtrado, ya que depende directamente de la concentración del PAH. De la misma manera que, la presencia de algunos metales pesados hace que se plantee la posibilidad de que la misma planta de tratamiento sea un contaminante.

Un claro ejemplo es el caso de Kjøholt y Hansen, que estudiaron el mismo buque (MS Ficaria Seaways) resultó en valores muy diferentes en ambos casos. Por ejemplo, en el caso de la concentración de metales en el agua residual del circuito cerrado, para Hansen se encontraba en valores tan reducidos que no se podían medir, mientras que, en el caso de Kjøholt, las concentraciones eran obvias y medibles sin ningún tipo de dificultad.

En resumen, desde un punto de vista ecológico, el flujo másico en el agua residual es tan importante como su concentración. En concreto, debemos destacar que, a largo plazo, la concentración de elementos no degenerativos, como son los metales, es muy importante. Además, los análisis que se han comentado en este apartado han querido representar los casos mas sensitivos, ya que el mar Báltico y el mar del norte son zonas consideradas sensibles a nivel ecológico.

Aún y ser las condiciones muy concretas, las que se han analizado, podemos llegar a la conclusión inequívoca de que los scrubbers que operan en sistema abierto producen unas descargas de elementos contaminantes mayores a los de los sistemas cerrados. Además, actualmente el uso de scrubbers es popular y esto lleva a la instalación de este elemento en cada vez más embarcaciones. Por lo tanto, si aumentan la cantidad de emisores de estas partículas metálicas al mar, el daño será cada vez mayor.

Otro factor importante que no se ha tenido en cuenta hasta el momento desde el punto de vista del análisis de la contaminación es el agua de mar utilizada para el proceso. Es decir, para las operaciones normales del buque como el lastrado y deslastrado, se requiere a las embarcaciones que dispongan del sistema de tratamiento de agua, que hagan uso del mismo para evitar la emigración forzosa de especies de una zona a otra y, consecuentemente, rotura del equilibrio existente en cada zona. De la misma manera, en el caso del scrubber, se usa el agua de mar y, por lo tanto, parte de la fauna marina de las zonas de operación, pueden sufrir las consecuencias. Hablamos, principalmente de las microalgas y pequeños invertebrados que sean succionados debido al alto flujo de agua de las bombas. Lo cual podría resultar en un futuro desequilibrio de ecosistema marino de las zonas comentadas. Por lo tanto, debería considerarse este aspecto para futuros estudios.

## Daños al medio ambiente producidos por estos componentes

### - pH

- El agua de mar tiene un valor de pH relativamente estable y, cuando no está influenciado por ningún factor externo, suele estar entre 7.8 y 8.4, aunque de todos modos las zonas con más posibilidades de presentar algún tipo de variación estaría en los primeros 25 metros de profundidad.

El pH es muy importante para varios procesos de los organismos marinos, como son las actividades enzimáticas.

### - Contaminantes

- Un importante problema que existe en la actualidad es la contaminación del medio marino con metales pesados, ya que estos no desaparecen y se van acumulando en el medio ambiente y en la cadena alimenticia. Por ejemplo, en el efluente del scrubber habrá cadmio, plomo y mercurio. Aunque, otros contaminantes importantes, como hemos dicho en apartados anteriores son los PAH, que resultan de la combustión de combustibles pesados.

### - Componentes biológicos

- La acumulación de partículas orgánicas ("zooplancton") a partir de componentes inorgánicos disueltos por Los organismos activos fotosintéticos ("fitoplancton") son el punto de partida y el centro del CO<sub>2</sub>, amortiguación del océano y la cadena alimentaria. La cantidad y número de especies de sílice, las algas verdes y otras fitoplanctónicas varían en el calor, la luz y el periodo de riqueza de nutrientes de vegetación.

La acumulación de nutrientes y la descarga de contaminantes orgánicos e inorgánicos, el desorden biológico y los efectos del cambio climático son los problemas principales del fitoplancton, que forma parte de la base de la cadena alimenticia.

### - Temperatura

- La temperatura y la salinidad determinan las condiciones del mar. Un cambio en la temperatura tendría un efecto inmediato que llevará a unas respuestas fisiológicas de los organismos presentes.

El cambio de temperatura inducido por el humano proviene principalmente de las descargas de agua de refrigeración de las embarcaciones, o bien, del calor de los cables submarinos.

Por otro lado, debemos recordar que la solubilidad del oxígeno en el agua depende de la temperatura de la misma, por lo que, un aumento de la temperatura marina, podría acabar resultando en una deficiencia del oxígeno en el agua de mar.



Todas las consecuencias descritas anteriormente también dependen, en gran parte, de la ubicación concreta donde se esté analizando, porque los efectos se verán reflejados, primeramente, en las zonas más cerradas, como son los puertos o estuarios. Y, además, es importante recalcar que la WFD alemana define 33 sustancias altamente nocivas para el medio marino, de las cuales 5 fueron encontradas en la descarga del scrubber.

## Alternativas al scrubber existentes en la actualidad

### Reductor de $NO_x$ de Wärtsilä

El sistema planteado por Wärtsilä es un sistema innovador que consigue cumplir con varias normativas restrictivas de emisiones como es la IMO tier 3, de la misma manera que, en el caso de necesitar unas restricciones mayores a las que presenta el modelo estándar, se puede adaptar a las necesidades del cliente.

Las partes principales del sistema NOR las podemos ver en la ilustración 19, y son:

1. Unidad de mezcla e inyección
2. Unidad de control
3. Unidad de dosificación
4. Unidad de aire
5. Unidad de bombeo
6. Reactor NOR
7. Unidad de soplado de hollín
8. Tanque de urea
9. Compresores de aire

Teniendo la posibilidad de añadir:

1. Analizador de  $NO_x$
2. Sistema de sensores de  $NO_x$
3. Tubo de mezcla
4. Estación de compresión, para la inyección de urea a través de la unidad de soplado de hollín

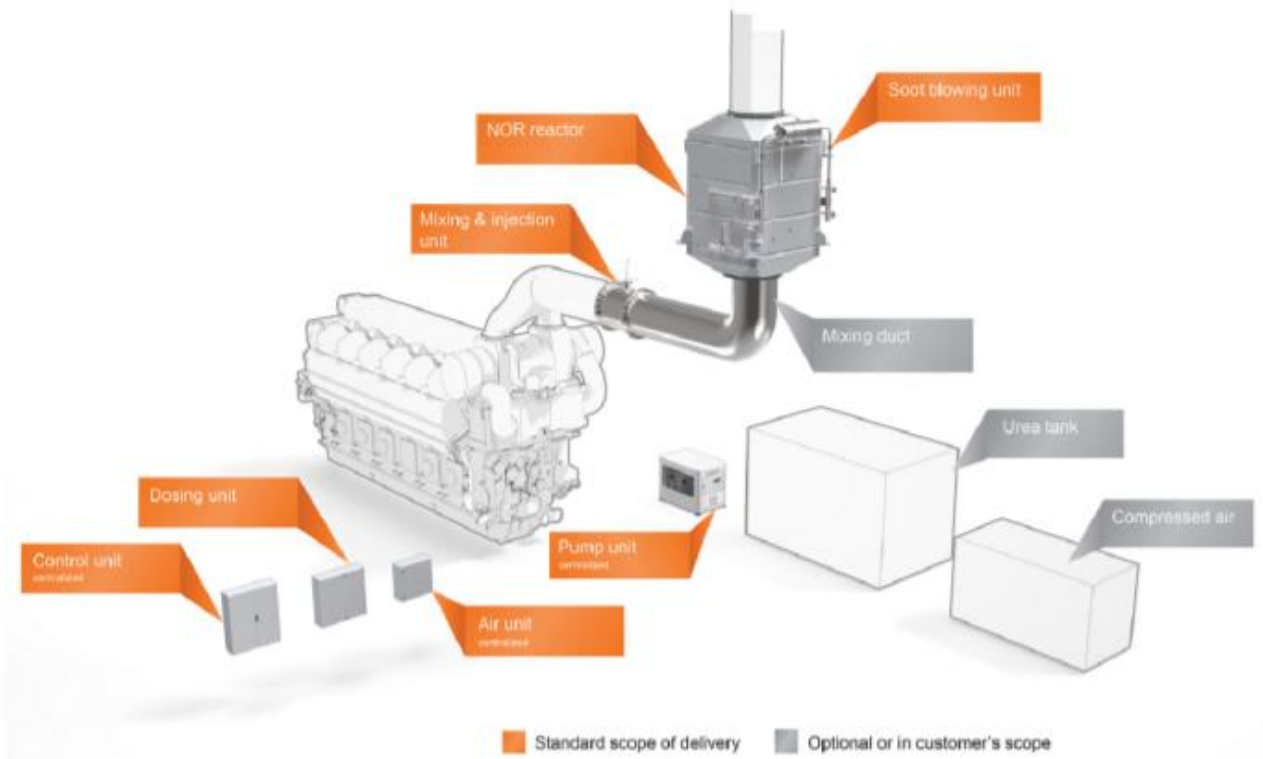


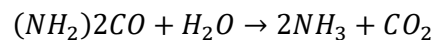
Ilustración 21 Sistema de reducción de  $NO_x$  planteado por Wärtsilä. Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment>

## Reducción catalítica selectiva (SCR)

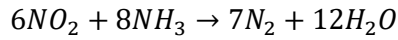
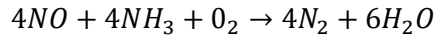
El principio de funcionamiento del sistema, para llevar a cabo la reducción del óxido de nitrógeno que hay en los gases de escape, se basa en la reducción catalítica selectiva. Es decir, a través de elementos catalíticos y un agente reductor.

El proceso empieza con una solución de agua y urea que se inyecta al escape del motor. Lo cual produce 2 reacciones:

1. El agua de la solución se evapora
2. La urea se descompone, resultando en amoníaco y dióxido de carbono



Las emisiones de  $NO_x$  que estaban presentes en los gases de escape, se convierten en nitrógeno molecular ( $N_2$ ) y agua ( $H_2O$ ), debido a que reacciona con el amoníaco en una superficie catalítica:



Los elementos catalíticos están dentro de una caja metálica en la línea de los gases de escape del motor. Los componentes resultantes son nitrógeno puro y agua, por lo que no hay ni sólidos ni líquidos resultantes, solo gaseosos.

Una unidad de bombeo transfiere urea desde el tanque de almacenamiento a la unidad de dosificación, que regula el flujo de solución de urea al sistema de inyección en función del funcionamiento del motor y la humedad de aire ambiente. El ajuste de control de urea basado en sensor de humedad garantiza emisiones Tier 3, en todas las condiciones ambientales. La unidad de dosificación también controla el flujo de aire comprimido al inyector de urea.

El inyector de urea rocía la solución de urea en el conducto de gases de escape. Después de la inyección de urea, el gas de escape fluye a través de la tubería de mezcla hacia el reactor, donde la reducción de  $NO_x$  se lleva a cabo en los elementos del catalizador. El reactor está equipado con un sistema de soplado de hollín para mantener los elementos catalizadores limpios.

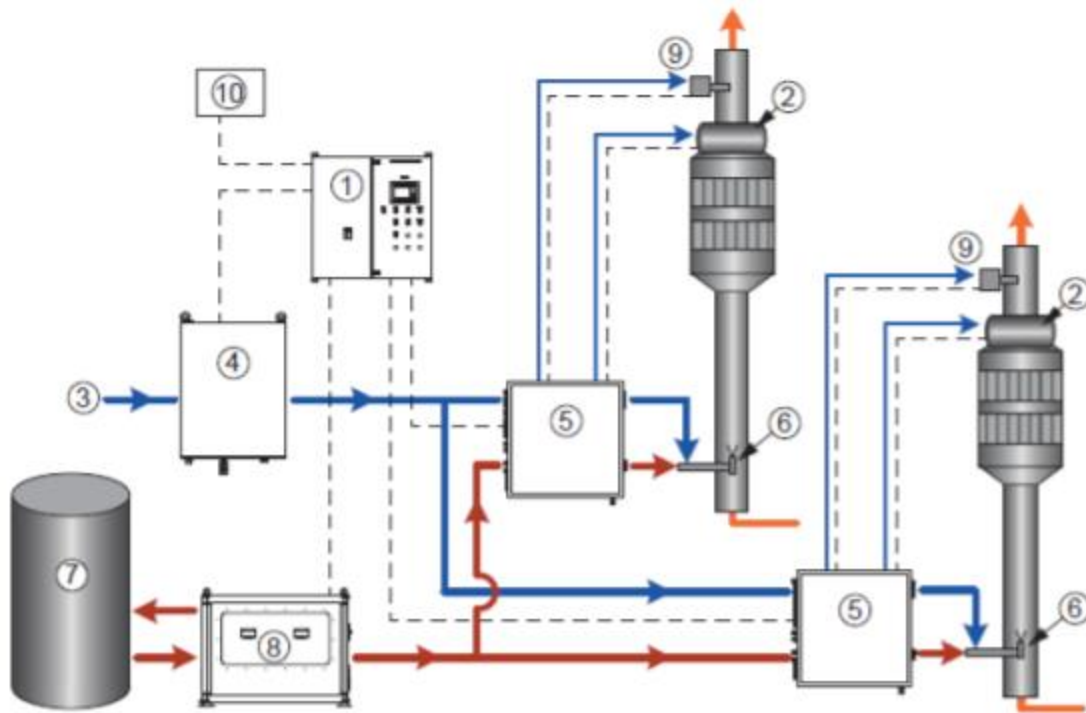


Ilustración 22 Esquema general del sistema SCR. Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment>

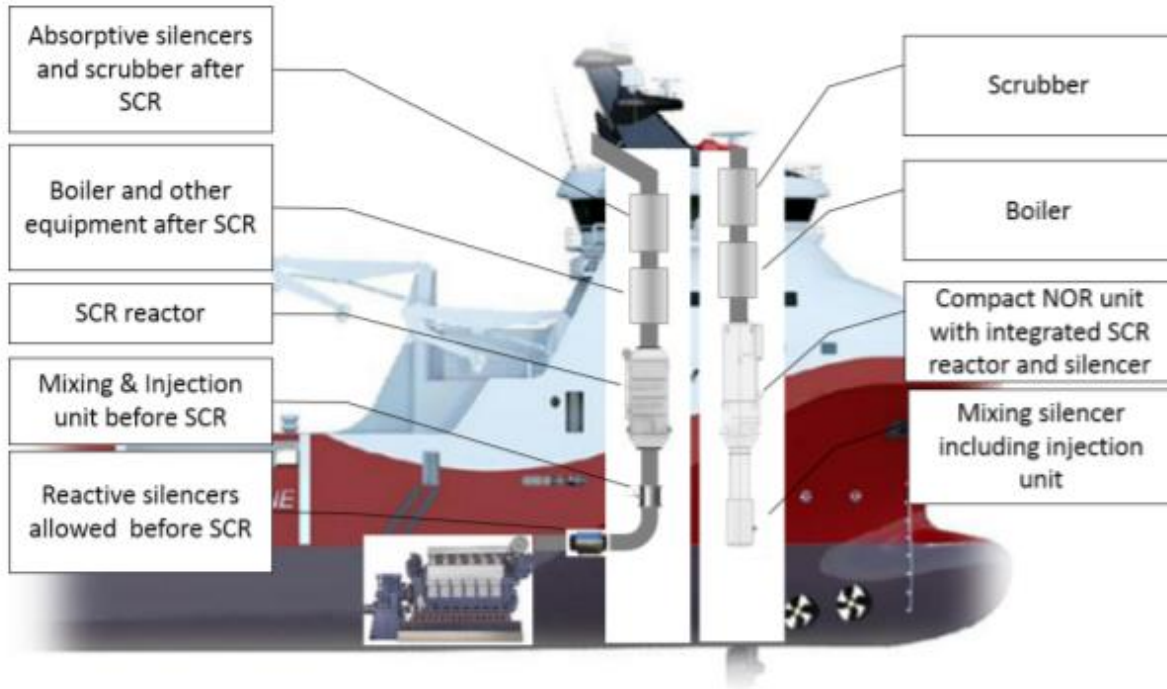
Componentes del sistema SCR			
1	Unidad de control	6	Inyector
2	Soplador de hollín	7	Tanque de urea
3	Aire comprimido	8	Unidad de bombeo
4	Unidad de aire	9	Sensor de $NO_x$
5	Unidad de dosificación	10	Sensor de humedad

## Reactor SCR

Un reactor SCR es necesario por cada motor y escape. El cual consiste en un tubo de acero que tiene un cono de entrada y otro de salida, una serie de capas de catalizador, varias entradas de aire comprimido en cada capa catalizadora para los sopladores de hollín. De la misma manera, el reactor dispone de transmisores de presión diferencial y sensores de temperatura, para la monitorización del estado del catalizador y la temperatura de los gases de escape.

Una de las características importantes del sistema SCR que presenta Wärtsila es su gran versatilidad y adaptación al espacio del que disponga la embarcación. Esto es así porque, por un lado, se puede instalar en horizontal o vertical y el grosor de las capas catalizadoras son también ajustables en el caso de que el espacio sea reducido. Además, es importante tener en cuenta que podemos añadir la insolación acústica del escape a través de la instalación de silenciadores tanto antes del reactor, como después.

El sistema SCR no necesariamente es aplicable solamente a las embarcaciones que no dispongan de un sistema de limpieza de gases, sino que, si el cliente lo precisara, se puede añadir a un escape que ya cuenta con un scrubber instalado, como podemos ver en la ilustración 21.



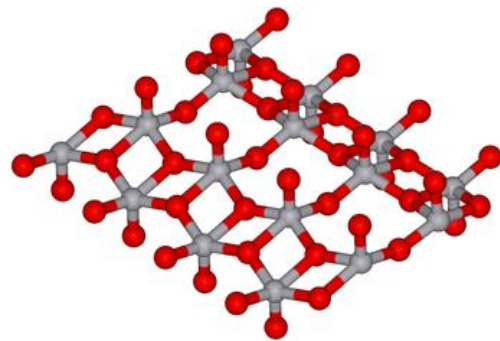
Il·lustración 23 Estructura de una instalación con silenciador y scrubber, juntamente con el sistema SCR. Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment>

Es importante recalcar que el reactor SCR estándar está dimensionado para una reducción de NO<sub>x</sub> del nivel IMO Tier 2 al nivel IMO Tier 3, tanto para MGO como HFO. Pero, como se ha comentado anteriormente, existe la posibilidad de adaptación a cada caso concreto bajo pedido.

### Elementos catalizadores

Los elementos catalizadores se sitúan en el interior del reactor en marcos de acero, con una estructura de panal de abejas, para poder aumentar la superficie catalítica. El material catalizador que se usa en este caso es el óxido de vanadio (V) (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

Es importante tener en cuenta que la eficiencia del material catalizador va decreciendo progresivamente con el tiempo, aunque se lleven a cabo sopladados continuamente para eliminar el hollín, la vida útil típica de estos materiales es de 4-6 años.



Il·lustración 24 Estructura molecular del óxido de vanadio(V). Fuente: [es.wikipedia.org](https://es.wikipedia.org)

## Sistema de soplado de hollín

Cada reactor dispone de su propio sistema remoto de soplado de hollín, cuyo objetivo es eliminar el hollín presente en los elementos catalíticos y, así, evitar el taponamiento de las tuberías y, consecuentemente, un aumento del diferencial de presión que llegaría a crear problemas al motor.

## Unidad de bombeo de Urea

La unidad de bombeo de urea se encarga de garantizar el abastecimiento de urea al sistema de dosificación. Esta unidad consta de 2 bombas de tipo tornillo, para garantizar el abastecimiento en el caso de fallo de una de ellas. Estas bombas tienen varias seguridades como son, la monitorización de la temperatura y presión. Además, el sistema tiene protecciones contra el rebose y de contraflujo, para garantizar la operación en las condiciones más óptimas posibles.

## Unidad de dosificación de urea

La unidad de dosificación determina la cantidad de urea necesaria para el sistema de inyección, dependiendo de la carga y condiciones del motor. A la vez que es la encargada de proveer aire comprimido al sistema de soplado de hollín. Una unidad de dosificación debe ser instalada para cada sistema SCR y, la otra, debería estar cerca del tanque de urea, por ejemplo, en la sala de máquinas.

## Unidad de aire

Esta unidad está formada por elemento filtrador, reguladores de presión y un transmisor de presión de salida. La unidad de aire dispone de unas conexiones con el sistema SCR para hacer posible, la función de dosificación y la de limpieza del hollín.

## Unidad de control

La unidad de control SCR es un sistema de control común para el sistema SCR completo. Cada módulo está conectado a este sistema de control a través de conexiones de bus de campo o conexiones cableadas.

En el sistema de control, toda la funcionalidad y el control se procesan y ejecutan automáticamente dependiendo del estado de funcionamiento del motor y del estado del sistema SCR. Alarmas, valores de proceso y la información de estado del sistema se envía a través del bus de campo (Modbus TCP o Modbus RTU) a el sistema de automatización del buque. Si el sistema de control SCR no está conectado a los sistemas del barco a través del enlace Modbus serial o Ethernet recomendado, las alarmas de grupo digitales cableadas e indicación de estado son la conexión mínima obligatoria entre el SCR y la alarma del barco y sistemas de seguimiento.

La inyección de urea se basa en el funcionamiento del motor. La unidad de control recibe el motor señal de carga y velocidad, y ajusta la dosificación de urea en consecuencia. Cuando la carga del

motor aumenta, la dosificación de urea también aumenta para mantener una reducción eficaz del óxido de nitrógeno.

La dosificación de urea también puede controlarse mediante una señal de retroalimentación del sensor opcional de  $NO_x$ , analizador de emisiones o analizador de emisiones externo.

Los sopladores de hollín funcionan automáticamente a un intervalo preestablecido. El sistema de control inicia el hollín que sopla abriendo las válvulas de solenoide en las líneas de aire comprimido. Durante el hollín secuencia de soplado, las válvulas de soplado de hollín se operan por turnos, para limpiar una capa de catalizador a la vez.

Si el sistema está en modo stand by, la inyección de urea se activa automáticamente cuando el motor ha arrancado y se alcanza la temperatura mínima del reactor. En consecuencia, cuando el motor se detiene, la dosificación de urea se apaga. El sistema de inyección se purga automáticamente de urea después de una parada. El sistema SCR detendrá automáticamente la inyección de urea cuando se esté llevando a cabo el lavado de la turbina. La inyección de urea se detiene cuando la lectura del sensor de temperatura de entrada SCR indica una temperatura de los gases de escape demasiado baja. Esta es una característica de seguridad para evitar la inyección de urea en gases de escape demasiado frío. Como el lavado de turbinas se activa manualmente, se recomienda comprobar que no hay alarmas relacionadas con la falla del sensor de entrada al SCR. Si hubiere un sensor en fallo, relacionado con el SCR, se requiere una parada manual del sistema SCR para detener la dosificación de urea y el sensor defectuoso debe ser reemplazado. El diseño del sistema de control SCR se ilustra en la siguiente ilustración

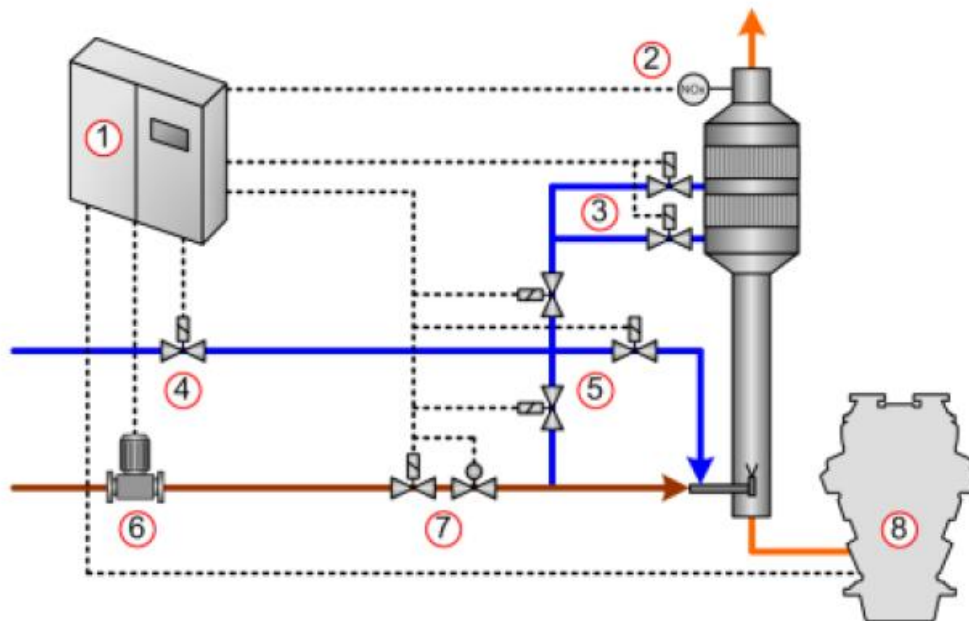


Ilustración 25 Distribución de los elementos de control. Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment>



Componentes del sistema			
1	Unidad de control	5	Válvulas de control del aire comprimido
2	Sensor de $NO_x$ (opcional)	6	Unidad de bombeo
3	Válvulas de soplado de hollín	7	Válvulas de control de la dosificación de urea
4	Unidad de aire	8	Motor

## Inyección de urea y unidad de mezcla

El agente reductor se pulveriza en el conducto de gases de escape y se mezcla con los gases de escape antes de que entre en el reactor. La inyección de urea se realiza con aire comprimido. Un inyector se instala en el conducto de gases de escape y se extiende hasta el centro del conducto. La lanza consta de dos tubos coaxiales, de los cuales el interior se utiliza para la solución de urea y el exterior para aire comprimido. La urea y el aire comprimido se mezclan en una boquilla de inyección en el extremo de la lanza, provocando la inyección de una solución de urea en el gas de escape en forma de una fina pulverización.

Se instala una placa mezcladora en el conducto de gases de escape antes del inyector de urea. El mezclador estático asegura que el agente reductor se mezcle uniformemente con los gases de escape. Después de la inyección del agente reductor, el flujo de gas de escape pasa a través de un conducto de mezcla donde la urea se transforma en amoníaco y se mezcla homogéneamente antes de que llegue al reactor con los elementos catalizadores. La siguiente figura ilustra la disposición del conducto de mezcla e inyección de urea.

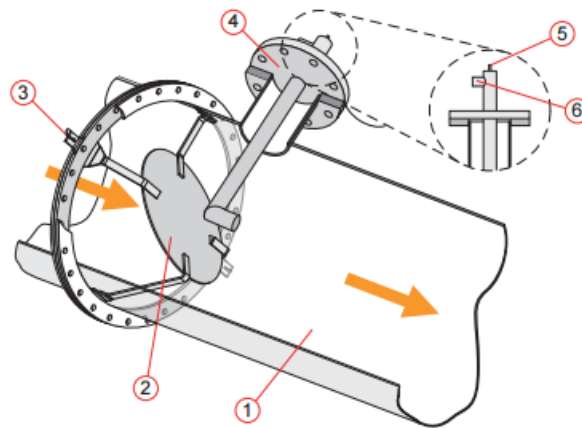


Ilustración 26 Inyección de urea y unidad de mezcla. Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment>



Componentes del sistema			
1	Conducto de inyección	4	Brida de inyección
2	Plato de mezcla	5	Conexión de urea
3	Indicador de orientación del plato de mezcla	6	Conexión de aire

## Condiciones de operatividad y limitaciones

### *Caída de presión*

La caída de presión debe ser medida continuamente, ya que la caída de presión ideal para el sistema es inferior a 15 mbar, para un 100% de carga del motor.

### *Monitorización de la temperatura de los gases de escape*

La temperatura de los gases de escape es muy importante para el sistema ya que, dependiendo del combustible usado y las condiciones de operación, puede resultar en una situación problemática para el sistema.

Siempre se debe estudiar la compatibilidad del sistema con el motor en cuestión y las condiciones de operación que se prevean para el mismo. Estas cuestiones ayudarán a la efectiva operación del sistema y, consecuentemente, la reducción de emisiones de la manera más eficiente.

A la hora de llevar a cabo el diseño o el análisis de compatibilidad del sistema con la operatividad del motor, debemos tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. **Combustible:** Se debe tener en cuenta el combustible usado por el motor y si este varía o no. Por ejemplo, si el buque consume HFO, pero, al entrar en zonas ECA, cambia a LFO, requiriendo entonces del arranque del sistema de rociado de urea.
2. **Temperatura de los gases de escape:** Con el sistema operativo, debe ser suficiente para la eficiente operación del sistema. Y, con el la planta de limpieza apagada, la temperatura debe ser suficientemente elevada para evitar taponamientos y suficientemente baja, para evitar la neblina azul.
3. **Diseño catalítico:** Es importante para el diseño del sistema para una operación correcta y eficiente. Y, con la planta apagada, el consumo de HFO establece límites para la elección del tipo de catalizador.

## Mantenimientos requeridos

En la siguiente tabla, exponemos los mantenimientos necesarios para el sistema NOR:

Intervalo	Unidad	Mantenimiento necesario
<b>2 meses</b>	Reactor del sistema de soplado de Hollín	Chequear válvula de soplado
<b>3 meses</b>	Unidad de aire	Inspección de la unidad
<b>6 meses</b>	Unidad de bombeo de urea	Inspección de las bombas
	Unidad de bombeo de urea	Mantenimiento del filtro de urea
	Unidad de dosificación de urea	Inspección de la unidad
	Reactor	Limpieza e inspección del catalizador
		Inspección del transmisor de la presión diferencial
<b>1 año</b>	Inyección de urea	Mantenimiento de la lanza pulverizadora
	Reactor	Limpieza e inspección del catalizador
<b>2 años</b>	Unidad de bombeo de urea	Engrase y lubricación de la transmisión de las bombas
		Reacondicionamiento de la bomba de urea

Tabla 20 Plan de mantenimientos requeridos para el sistema NOR. Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment>

### Control de emisiones $SO_x$

Desde el 2005 Wärtsilä trabaja con el sistema de limpieza de gases de escape tipo scrubber y en la actualidad se ha llegado a la reducción de las descargas a través de cambiar el concepto que se planteaba años atrás, que consistía en la instalación de un scrubber por motor.

En el caso de Wärtsilä, se plantea una opción que anteriormente no se había visto y consiste en la instalación de un único scrubber, con las salidas correspondientes de gases, que emiten los gases a la atmósfera gracias al efecto Venturi.

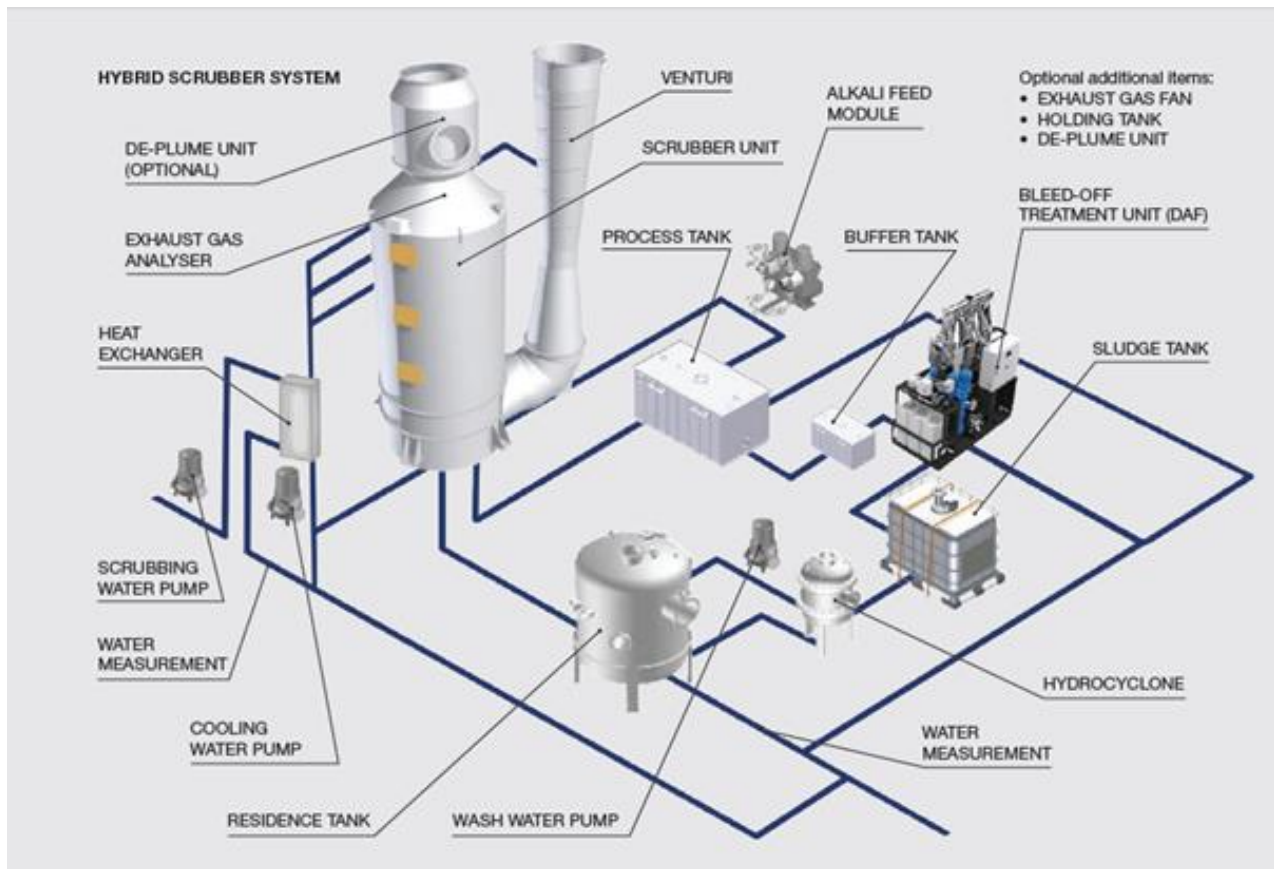


Ilustración 27 Sistema híbrido planteado por Wärtsilä. Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment>

El planteamiento principal de limpieza es, en gran parte, muy similar al que hemos definido en los apartados anteriores, en el que el objetivo principal es la mezcla del agua con los gases de escape, para poder reducir la cantidad de  $SO_x$  presente en el mismo. Lo diferente, a destacar, es la instalación de esta planta principal de limpieza en la que podemos tener varias entradas y varias salidas como vemos a continuación:



*Ilustración 28 Instalación con 1 entrada y 1 salida de gases con efecto Venturi. Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment>*



*Ilustración 29 Instalación con varias entradas y salidas de gases con efecto Venturi. Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/exhaust-treatment>*

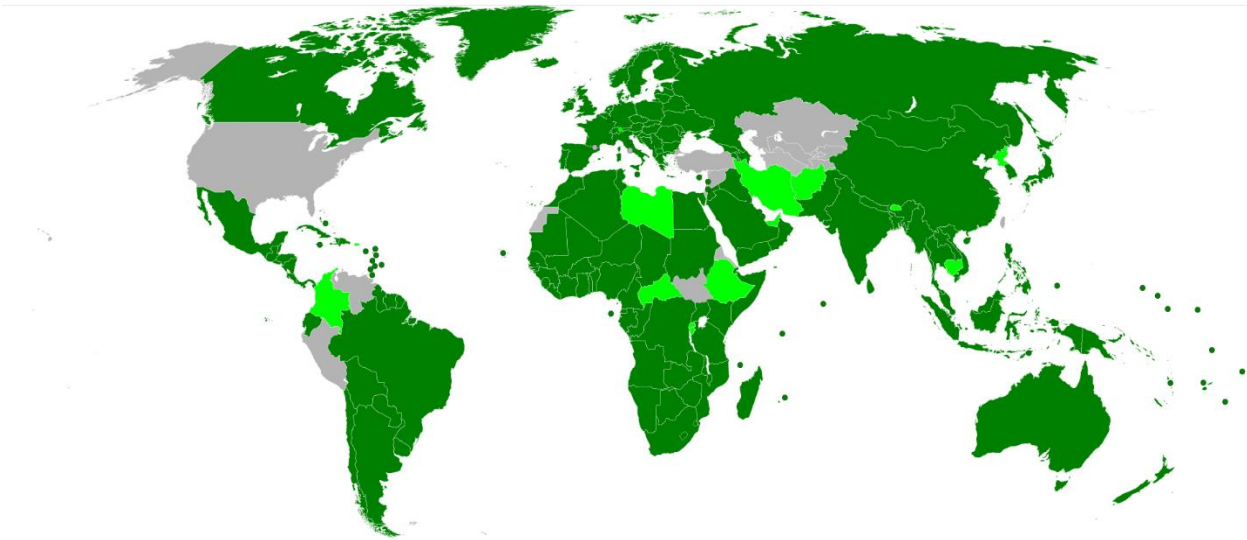
## Sugerencias de normativa futura

Una de las claras conclusiones que hemos podido extraer del análisis presentado anteriormente es, principalmente, la falta de una normativa que lleve a cabo una regulación real de la operatividad del scrubber. De manera que, a continuación, el objetivo será la sugerencia de varias opciones normativas que podrían ayudar al avance del sector hacia la limpieza real de los océanos, como viene siendo el objetivo desde que se planteó la primera normativa en este ambiente.

## Convención de las naciones unidas sobre el derecho del Mar (UNCLOS)

A continuación, en la ilustración 19, podemos ver la representación de los países que han firmado la convención de las naciones unidas sobre el derecho del mar. Lo que determina que países tienen la obligación general de proteger el medio marino, llevando a cabo regulaciones para prevenir descargas prohibidas al mar y la regulación para la reducción de la contaminación de los mismos.

España, al formar parte de los firmantes del acuerdo, debe llevar a cabo, al igual que todos los demás firmantes, la regulación y legislación para poder llegar a tales objetivos. Asegurándose de que no existe ni desplazamiento de la contaminación ni dilución de la misma.



*Ilustración 30 Representación mundial de los países firmantes de la UNCLOS. Fuente: [www.es.wikipedia.org](http://www.es.wikipedia.org)*

Además de las regulaciones definidas por la UNCLOS, debe estar en cumplimiento de la normativa definida por la OMI en este sentido. Que, más concretamente, sería el Anexo I del MARPOL. En el cual se definen unas limitaciones para aguas oleosas que se descargan al mar. Pero, allí es donde reside uno de los problemas de la normativa, ya que, en la actualidad, se aplica la misma normativa para las aguas oleosas, como para el efluente del scrubber, mientras que, en realidad, no está clara la relación entre las aguas oleosas y el efluente, para muchos casos. Así, que, en realidad, probablemente se pueda concluir que el Anexo I del MARPOL no debería regular el efluente del scrubber. Por lo tanto, es necesaria una revisión de las pautas del efluente y, si la presencia de aceites en el mismo se demuestra dañina para el medio ambiente marino, deberían definirse nuevas limitaciones para el caso concreto del scrubber.

Además de las ya numeradas, existe la directiva marco sobre la estrategia marina (MSFD), la cual requiere a todos los estados miembros que prohíban cualquier operación que lleve al deterioro de su zona costera y su zona económica exclusiva. Pero, de nuevo nos encontramos ante la normativa que permite la libre navegación de los buques. De manera que, el estado solo podría intervenir en el caso de una contaminación intencionada y seriamente dañina para el medio ambiente.

- **¿Es posible una restricción de las descargas de manera unilateral?**

Las restricciones a nivel de descargas al mar, el estado español, por ejemplo, podría unilateralmente limitar de alguna manera más restrictiva que en los demás estados del continente europeo, pero sería aplicable a los buques que enarbolan su pabellón y a los que quieren operar en aguas españolas, como hemos comentado en apartados anteriores. Pero, a la hora de querer regular el diseño del scrubber en sí, las prohibiciones serán mucho más fáciles de adoptar desde la perspectiva del derecho marítimo internacional y, de esta manera se aplicaría a todos los buques, independientemente del pabellón que enarbolan en cada caso concreto.

En el caso de los poderes legislativos y ejecutivos, se encuentran parcialmente limitados por el derecho de paso inocente. En la ZEE, sin embargo, el estado ribereño no puede establecer regulaciones unilaterales generalmente vinculantes, ya que es dependiente de la aprobación de la OMI.

- **Conclusiones sobre las opciones regulatorias**

Basado en las consideraciones de política legal y regulatoria discutidas y el conocimiento actual sobre el efecto de los efluentes del depurador en el medio marino, limitando la descarga de Los efluentes de los depuradores generalmente parece ser la herramienta más adecuada para evitar daños potenciales causados por el uso de los mismos. Solo constituye una pequeña interferencia con la libertad de la navegación en relación con los requisitos de construcción. Al mismo tiempo, permite uso básico de la tecnología de depuradores teniendo en cuenta las necesidades de la protección del medio ambiente. Una enmienda al Anexo I del MARPOL no parece una opción prometedora. Lo mismo se aplica al establecimiento de rutas alternativas para evitar las estas zonas de navegación.

En primer lugar, se puede recomendar un enfoque multilateral dentro de la OMI. Control territorial de la descarga de efluentes de depuradores parece un objetivo factible. La aplicación de protección Los métodos (APM) dentro de las PSSA deben tenerse en cuenta en particular. En segundo lugar, como estrategia de corto plazo, la prohibición concentrada de vertidos en las áreas de Las aguas y las aguas costeras podrían regularse de forma unilateral o junto con otros Estados miembros de la UE. Sin embargo, el contenido normativo de esta última opción permanecer subordinado a una reglamentación multilateral dentro de la OMI.





Ilustración 317 Rutas de los buques de carga en todo el mundo. Fuente: [www.es.gizmodo.com](http://www.es.gizmodo.com)

## Sugerencias para futuros proyectos

El conocimiento de los scrubbers, aunque estos ya lleven varios años en operación, sigue siendo insuficiente para tener una buena perspectiva del impacto medioambiental del mismo y sigue habiendo preguntas sin respuestas.

En principio, el uso de combustibles limpios como el LNG es preferible, antes que los sistemas de tratamiento posterior para la reducción de azufre. Si, aun así, se opta por el uso de los scrubbers, se recomendaría el uso de sistemas que tengan el mínimo o nula descarga al mar (sistemas secos o de ciclo cerrado).

Para poder evitar desventajas entre zonas y compañías, se recomendaría a los estados la legislación desde un punto de vista más global de las regulaciones y no locales, aunque sea de dificultad añadida, respecto a la legislación local. La propuesta de regulación global se basaría en, primeramente, la búsqueda de interacción económica entre puertos y reforzar la cooperación con convenciones marinas internacionales como la OSPAR, HELCOM y TWC, entre otras.

El aspecto más preocupante que hemos comentado hasta el momento la permanencia de los metales pesados en el mar, por lo que, se debería considerar la opción de llevar a cabo un registro de los metales pesados que son descargados al mar y exigir a las compañías permanecer bajo unos parámetros mínimos, a la vez que se buscan maneras de reducir aún más las mismas. Los datos que sean registrados deben tener un libro de registros donde quede constancia de las mismas y que sean inspeccionados a la vez que se lleva a cabo la inspección de los demás registros.



Por otro lado, es importante que todas las regulaciones que existen en la actualidad, del scrubber, fueron registradas en las pautas del 2009, abriéndose a la posibilidad de reevaluar la situación, una vez se tengan datos más fiables y que permitan extraer conclusiones más claras. Esto, hasta el momento, no se ha conseguido y tiene un avance relativamente lento, ya que los sistemas son conceptualmente iguales, pero operativamente diferentes, lo que complica el análisis objetivo de los resultados. Como primera medida importante, consideramos que se debería igualar el nivel de regulación del agua de lastre y el agua consumida por el scrubber, ya que, en términos operativos, se lleva a cabo la misma operación.

Además, debido al cambio climático, la reducción del pH del agua ya es una realidad, sin ninguna interacción directa con el agua. Si a lo que la naturaleza está haciendo a su ritmo, añadimos el efecto de las descargas de agua del scrubber, que cada vez es más popular, lo que estamos provocando es el aceleramiento del proceso y, consecuentemente, acelerando la llegada de las consecuencias que esto comportará. Para paliar este efecto dañino, sugerimos que el agua descargada al mar no sea de pH inferior a 0.5 al del agua de mar de la zona.



## Conclusiones

- Los scrubbers más dañinos son los de sistema abierto, respecto a los secos y los de ciclo cerrado.
- Los scrubbers en sistema abierto producen:
  - o Disminución del pH del agua
  - o Incremento de la temperatura del agua
  - o Descargas de metales pesados
  - o Posibles descargas de agentes contaminantes de los procesos químicos de los tratamientos, no se tiene información fiable para descartar esta opción
- El estado de las aguas de zonas como el mar del norte, el mar báltico o la costa alemana, está en unas condiciones preocupantes desde el punto de vista medioambiental, debido al gran tráfico de la zona que producen tanto las operaciones comerciales como las turísticas.
- En principio, el uso de combustibles limpios como el LNG es una de las soluciones más fiables por el momento.
- Los buques contaminan, pero debemos tener en cuenta las dimensiones de los buques y el poder de transporte que tienen, porque debemos recordar que los buques panamax, por ejemplo, llevan hasta 60.000 toneladas de carga y son el 19% de la flota mundial. Y, como segundo gran grupo, tenemos a los buques handymax, que transportan 30.000 toneladas y son un 24% de la flota mundial. La alternativa a los buques debe ser, como mínimo, igual de eficiente.
- Existe un desequilibrio del ecosistema marino, debido al flujo de agua de mar necesario para la operación del scrubber.
- Las regulaciones existentes se tuvieron que crear en unas condiciones que hacen muy difícil la regulación, debido al desconocimiento y, a la poca precisión en la definición de los sistemas que aptos.
- Se debe llevar a cabo una mayor investigación en este sector y una profundización en los procesos, ya que la información es insuficiente y el ritmo al que se va recogiendo la información, actualmente, es muy lenta.

- Las regulaciones en el sector naval son complejas. Esto condiciona de manera evidente la aplicación de las mismas. Es decir, en el caso de España, en el caso de querer prohibir el uso del scrubber, solo podría aplicar la norma a los buques de abanderados en España o bien en buques que no sean de bandera española pero que quieran acceder a las aguas territoriales del estado español. De manera que, de nuevo, se necesita de una regulación internacional que aplique globalmente y, como hemos comentado a lo largo del este documento, eso es de complejidad extrema, ya que, requiere el acuerdo de muchos países, con diferentes enfoques y diferentes puntos de vista.
- En la actualidad, existen alternativas al scrubber típico, pero, el proceso sigue siendo el mismo y la descarga al mar sigue existiendo. Y, si el objetivo es preservar el medio marino en la mejor de las condiciones, debemos centrar esfuerzos en la eliminación del uso del agua como principal componente del proceso y, en el caso de que se necesite el agua, reducirlo al máximo, para poder colectarlo a bordo y no tener la necesidad de descargarlo al mar.

## Bibliografía

1. Información mundial a tiempo real de todos los combustibles disponibles y precios para buques a tiempo real: [www.Shipandbunker.com](http://www.Shipandbunker.com)
2. Ficha técnica del motor e información relevante de la operación del mismo:  
<https://pdf.nauticexpo.es/pdf-en/man-diesel-se/marine-engine-programme/21500-120414.html#open>  
<https://www.man-es.com/>
3. Regulaciones OMI para la eliminación de los gases contaminantes del sector marino:  
[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/MEPC.259\(68\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/MEPC.259(68).pdf)
4. Propiedades del gas natural licuado:  
[www.kosancrisplant.com](http://www.kosancrisplant.com)
5. ABS, 2013: Exhaust Gas Scrubber Systems Advisory, American Bureau of Shipping,  
<https://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/References/Capability%20Brochures/ExhaustScrubbers> ,
6. Buhaug, Oyvind; Flogstad, Harald; Bakke, Torgeir 2006: MARULS WP3: Washwater Criteria for Seawater Exhaust Gas-SOx Scrubbers, in MEPC 56/INF.5 ANNEX 1 Buhaug (MARINTEK), Harald Flogstad (SINTEF), Torgeir Bakke (NIVA)
7. Caldeira K., Wickett ME (2003): Anthropogenic carbon and ocean pH. Nature 425
8. Clean Marine AS (2013): PM Clean Marine wins EGCS contract with Hyundai Heavy Industries, Oslo, Norway, [http://cleanmarine.no/press\\_room/](http://cleanmarine.no/press_room/)
9. Wärtsilä NOx Reducer:  
<https://www.wartsila.com/marine/build/engines-and-generating-sets/nox-abatement>
10. ABS advisory on exhaust gas scrubber systems.pdf
11. Regulación alemana y resultados de varias investigaciones hechas  
[www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)